

Beschreibung des verwandten Standes der Technik

Derartige Projektionsobjektive werden in Mikrolithographie-Projektions-
5 belichtungsanlagen zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und
anderen fein strukturierten Bauteilen verwendet. Sie dienen dazu, Mus-
ter von Photomasken oder Strichplatten, die nachfolgend allgemein als
Masken oder Retikel bezeichnet werden, auf einen mit einer licht-
empfindlichen Schicht beschichteten Gegenstand mit höchster Auflö-
10 sung in verkleinerndem Maßstab zu projizieren.

Dabei ist es zur Erzeugung immer feinerer Strukturen notwendig, einer-
seits die bildseitige numerische Apertur NA des Projektionsobjektivs zu
vergrößern und andererseits immer kürzere Wellenlängen zu verwen-
15 den, vorzugsweise Ultraviolettlicht mit Wellenlängen von weniger als ca.
260 nm, beispielsweise 248 nm, 193 nm oder 157 nm.

Für Wellenlängen bis hinunter zu 193 nm ist es möglich, mit rein refrak-
tiven (dioptrischen) Projektionssystemen zu arbeiten, deren Herstellung
20 aufgrund ihrer Rotationssymmetrie um die optische Achse gut be-
herrschbar ist. Um kleinste Auflösungen zu erreichen, muss hier jedoch
mit größten numerischen Aperturen NA von mehr als 0,8 oder 0,9
gearbeitet werden. Diese sind bei Trockensystemen mit ausreichend
grossem, endlichen Arbeitsabstand (Abstand zwischen der Austritts-
25 fläche des Objektivs und der Bildebene) nur schwer zu realisieren. Es
sind auch schon refraktive Immersionssysteme vorgeschlagen worden,
die durch Verwendung einer Immersionsflüssigkeit hoher Brechzahl
zwischen Objektivaustritt und Bildebene Werte von $NA > 1$ ermöglichen.

30 Für die genannten kurzen Wellenlängen wird es jedoch immer
schwieriger, rein refraktive Systeme mit ausreichender Korrektur von
Farbfehlern (chromatische Aberration) bereitzustellen, da die Abbe-

Konstanten geeigneter, transparenter Materialien relativ nahe beieinander liegen. Daher werden für höchstauflösende Projektionsobjektive überwiegend katadioptrische Systeme verwendet, bei denen brechende und reflektierende Komponenten, insbesondere also Linsen und brechende Spiegel, kombiniert sind.

Bei der Nutzung von abbildenden Spiegelflächen ist es erforderlich, Strahlumlenkeinrichtungen einzusetzen, wenn eine obskurationsfreie und vignettierungsfreie Abbildung erreicht werden soll. Es sind sowohl Systeme mit geometrischer Strahlteilung mittels einem oder mehreren voll reflektierenden Faltungsspiegeln (Umlenkspiegeln), als auch Systeme mit physikalischer Strahlteilung bekannt. Darüber hinaus können Planspiegel zur Faltung des Strahlenganges verwendet werden. Diese werden im allgemeinen verwendet, um bestimmte Bauraumanforderungen zu erfüllen oder um Objekt- und Bildebene parallel zueinander auszurichten. Diese Faltungsspiegel sind optisch nicht zwingend erforderlich.

Die Verwendung eines physikalischen Strahlteilers, beispielsweise in Form eines Strahlteilerwürfels (beam splitter cube, BSC) mit polarisationsselektiver Strahlteilerfläche, ermöglicht es, Projektionsobjektive mit um die optische Achse zentriertem Objektfeld (on-axis-Systeme) zu realisieren. Nachteilig an solchen Systemen ist, dass geeignete transparente Materialien für die Herstellung eines Strahlteilerwürfels in den erforderlichen großen Volumina nur bedingt verfügbar sind. Außerdem kann die Herstellung der polarisationsselektiv wirksamen Strahlteilerschichten erhebliche Schwierigkeiten bereiten. Eine unvollkommene polarisationsselektive Wirkung kann zur Entstehung von inzidenzwinkelabhängiger Lecktransmission und damit zu Intensitätsinhomogenitäten bei der Abbildung führen.

- Die Nachteile von Systemen mit polarisationsselektivem Strahlteiler können bei Systemen mit geometrischer Strahlteilung, d.h. bei Verwendung von voll reflektierenden Faltungsspiegeln in der Strahlumlenkeinrichtung, weitgehend vermieden werden. Ein solcher Faltungsspiegel erlaubt es,
- 5 den zu einem Konkavspiegel führenden optischen Weg von dem vom Konkavspiegel wegführenden optischen Weg räumlich zu separieren. Es entfallen viele Probleme, die sich aus der Verwendung von polarisiertem Licht ergeben können.
- 10 Bei Projektionsobjektiven mit geometrischer Strahlteilung sind verschiedene Faltungsgeometrien möglich, wobei abhängig vom Verlauf des Lichtweges zwischen Objektfeld und Bildfeld spezifische Vor- und Nachteile vorliegen.
- 15 Die Patentschrift US 6,195,213 B1 zeigt verschiedene Ausführungsformen von Projektionsobjektiven mit geometrischer Strahlteilung zur Abbildung eines in einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer Maske in eine Bildebene des Projektionsobjektives unter Erzeugung eines einzigen, reellen Zwischenbildes. Die Projektionsobjektive, die bildseitige numerische Aperturen bis $NA = 0,75$ erreichen, haben einen katadioptrischen ersten Objektivteil, der zwischen der
- 20 Objektebene und der Bildebene angeordnet ist und einen Konkavspiegel sowie eine Strahlumlenkeinrichtung aufweist sowie einen dioptrischen zweiten Objektivteil, der zwischen dem ersten Objektivteil und der
- 25 Objektebene angeordnet ist. Die für die Erzeugung des Zwischenbildes genutzten Elemente des ersten Objektivteils sind so ausgelegt, dass das Zwischenbild optisch und geometrisch in der Nähe des ersten Faltungsspiegels liegt. Die Strahlumlenkeinrichtung hat einen ersten Faltungsspiegel, der im Strahlungsweg zwischen dem Konkavspiegel und der
- 30 Bildebene angeordnet ist. Bei diesen Systemen ist der erste Faltungsspiegel so angeordnet, dass von der Objektebene kommendes Licht zunächst auf den Konkavspiegel des ersten Objektivteils fällt, bevor es

von diesem zum ersten Faltungsspiegel reflektiert wird. Von diesem wird es um 90° umgelenkt und zu einem zweiten Faltungsspiegel reflektiert, der die vom ersten Faltungsspiegel kommende Strahlung nochmals um 90° in Richtung Bildebene umlenkt. Diese Strahlungsführung führt zu einem h-förmigen Aufbau des Systems, weshalb diese Faltungsgeometrie auch als h-Faltung bezeichnet wird. Das Projektionsobjektiv hat nur einen Konkavspiegel.

Im Bauraum zwischen Objektebene und erstem Faltungsspiegel sind mehrere der optischen Korrektur dienende Linsen untergebracht. Der Bereich zwischen den Faltungsspiegeln ist frei von Linsen, wodurch eine kompakte Bauform ermöglicht werden soll. Damit sind alle Linsen und der Konkavspiegel in vertikal ausrichtbaren Objektivteilen angeordnet, wodurch ein gegen Schwerkräfteinflüsse stabiler Aufbau erreicht werden soll.

In der Patentschrift US 5,969,882 (entsprechend EP-A-0 869 383) sind andere Projektionsobjektive mit h-Faltung und nur einem Konkavspiegel beschrieben, bei denen im Bauraum zwischen Objektebene und erstem Faltungsspiegel Linsen angeordnet sind. In Ausführungsformen, bei denen der erste und der zweite Faltungsspiegel als reflektierende Flächen eines Umlenkprismas ausgestaltet sind, ist der Bereich zwischen den Faltungsspiegeln brechkraftfrei.

Das Europäische Patent EP 0 604 093 B1 und das über eine gemeinsame Priorität verbundene US-Patent US 5,668,673 zeigen katadioptrische Projektionsobjektive mit relativ geringen numerischen Aperturen von $NA \leq 0,5$, bei denen das Objektfeld mit Hilfe von zwei Konkavspiegeln unter Erzeugung eines einzigen reellen Zwischenbildes in das Bildfeld abgebildet wird. Es sind Ausführungsformen mit unterschiedlichen, teilweise komplexen Faltungsgeometrien gezeigt, wobei sich bei manchen Ausführungsformen ein von der Objektebene zu einem

Konkavspiegel verlaufender erster Strahlabschnitt und ein von diesem Konkavspiegel zur Bildebene verlaufender zweiter Strahlabschnitt überkreuzen. Die komplexen Faltungsgeometrien mit einer Vielzahl von räumlich nah beieinander stehenden optischen Komponenten lassen erhebliche mechanische und fassungstechnische Probleme bei der praktischen Umsetzung solcher Designs erwarten. Eine Übertragung der Designkonzepte in den Bereich höherer numerischer Aperturen scheint aufgrund der damit verbundenen größeren maximalen Strahlbündeldurchmesser und der entsprechend wachsenden maximalen Linsendurchmesser nicht praktikabel.

Die EP-A-0 889 434 (entsprechend US-Serial-No. 09/364382) zeigt Projektionsobjektive mit einer als Spiegelprisma ausgebildeten Strahlumlenkeinrichtung. Das Spiegelprisma bildet einen ersten Faltungsspiegel zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel und einen zweiten Faltungsspiegel zur Umlenkung der vom Konkavspiegel reflektierten Strahlung zum zweiten Objektivteil, der nur refraktive Elemente enthält. Der katadioptrische erste Objektivteil erzeugt ein reelles Zwischenbild, welches frei zugänglich mit Abstand hinter der zweiten Spiegelfläche liegt. Der einzige Konkavspiegel ist in einem im Einbauzustand quer zur Vertikalrichtung abstehenden Seitenarm des Projektionsobjektivs angebracht, der auch als „Horizontalarm“ (HOA) bezeichnet wird. Aufgrund der 1-förmigen Geometrie des Strahlweges wird eine solche Faltungsgeometrie als „1-Faltung“ bezeichnet. Andere Projektionsobjektive mit nur einem Konkavspiegel und 1-Faltung sind beispielsweise in der DE 101 27 227 (entsprechend US-Patentanmeldung US 2003/021040) oder der Internationalen Patentanmeldung WO 03/050587 beschrieben.

Systeme mit geometrischem Strahlteiler haben den prinzipbedingten Nachteil, dass das Objektfeld exzentrisch zur optischen Achse angeordnet ist (außeraxiales System bzw. off-axis-System). Dies stellt erhöh-

te Anforderungen an die Korrektur von Bildfehlern, da bei einem solchen Abbildungssystem im Vergleich zu on-axis-Systemen bei gleicher Objektfeldgröße ein größerer nutzbarer Felddurchmesser ausreichend korrigiert sein muss. Dieser das Objektfeld einschließende größere Feldbereich wird im Folgenden auch als „Überfeld“ bezeichnet.

Eine Optimierung der Größe des Überfeldes wird bei Steigerung der numerischen Apertur des Projektionsobjektivs immer schwieriger, da die Freiräume zur Anordnung und Dimensionierung von optischen Komponenten, und hier insbesondere der Faltungsspiegel, unter der Randbedingung einer vignettierungsfreien Abbildung immer geringer werden. Außerdem bereitet die mechanische Fassung der optischen Komponenten zunehmend Schwierigkeiten, je komplexer deren relative Anordnung zueinander ist.

15

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, katadioptrische Projektionsobjektive bereitzustellen, die bei einem endlichen Arbeitsabstand auch bei höchsten numerischen Aperturen eine hohe Abbildungsqualität ermöglichen. Dabei soll eine günstige Geometrie für eine stabile Fassung von optischen Komponenten erreicht werden. Insbesondere soll eine Steigerung der bildseitigen numerischen Apertur in Bereiche von $NA \geq 0,8$ oder $NA \geq 0,9$ ermöglicht werden, die bei einer Verwendung solcher Projektionsobjektive bei der Immersions-Lithografie oder bei der Nahfeld-Lithografie nutzbare numerische Aperturen von $NA \geq 1$ ermöglichen.

Als Lösung für diese Aufgabe stellt die Erfindung, gemäß einer Formulierung der Erfindung, ein katoptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters in eine Bildebene des Projektionsobjektivs bereit, bei dem bei der Abbildung mindestens ein reelles Zwischenbild erzeugt wird und

30

eine bildseitige numerische Apertur von $NA > 0,7$ erreicht wird. Das Projektionsobjektiv umfasst:

eine optische Achse; und

mindestens einen katadioptrischen Objektivteil, der einen Konkavspiegel

5 und einen ersten Faltungsspiegel umfasst;

wobei ein von der Objektebene zum Konkavspiegel verlaufender erster Strahlabschnitt und ein vom Konkavspiegel zur Bildebene verlaufender zweiter Strahlabschnitt erzeugbar sind;

und der erste Faltungsspiegel in Bezug auf den Konkavspiegel derart
10 angeordnet ist, dass einer der Strahlabschnitte an dem ersten Faltungsspiegel gefaltet wird und der andere Strahlabschnitt den ersten Faltungsspiegel vignettierungsfrei passiert und der erste Strahlabschnitt und der zweite Strahlabschnitt sich in einem Kreuzungsbereich überkreuzen.

15

Die gekreuzte Strahlführung im Bereich des katadioptrischen Objektivteils ermöglicht Projektionsobjektive mit einer kompakten und mechanisch stabilen Anordnung der optischen Komponenten. Dabei kann eine vignettierungsfreie Strahlführung erreicht werden, so dass kein Faltungsspiegel ein Strahlungs Bündel, welches entweder am Faltungsspiegel reflektiert wird oder ohne Reflexion am Faltungsspiegel vorbeigeführt wird, beschneidet. Auf diese Weise limitiert nur die Systemblende in einer axialsymmetrischen Weise die Winkelverteilung der Strahlen, die zur Bildgebung beitragen. Gleichzeitig kann auch bei höchsten numerischen Aperturen, die mit großen maximalen Strahlbündeldurchmessern und gegebenenfalls stark konvergenten oder divergenten Strahlbündeln im Bereich von Feldebene verbunden sind, eine moderate Größe des zu korrigierenden Überfeldes erreicht werden.

20

25

30

Die Erfindung kann bei unterschiedlichen Faltungsgeometrien genutzt werden. Bei manchen Ausführungsformen ist der erste Faltungsspiegel so angeordnet, dass der erste Strahlabschnitt am ersten Faltungsspiegel

gefaltet wird und der zweite Strahlabschnitt den ersten Faltungsspiegel vignettierungsfrei passiert. Dabei hat der erste Faltungsspiegel typischerweise eine der optischen Achse abgewandte Spiegelfläche. Diese Strahlführung, bei der die mittelbar oder unmittelbar von der Objektebene zum katadioptrischen Objektivteil laufende Strahlung zunächst auf den ersten Faltungsspiegel trifft, ist typisch für Objektive mit der eingangs erwähnten 1-Faltung.

Bei anderen Ausführungsformen ist der erste Faltungsspiegel so angeordnet, dass der erste Strahlabschnitt, d.h. die unmittelbar oder mittelbar von der Objektebene kommende Strahlung, den ersten Faltungsspiegel vignettierungsfrei passiert und der zweite Strahlabschnitt, d.h. die vom Konkavspiegel reflektierte Strahlung, am ersten Faltungsspiegel gefaltet wird. Hierbei kann der erste Faltungsspiegel eine der optischen Achse zugewandte Spiegelfläche haben, so dass die Strahlung auf dem Weg vom Konkavspiegel zu nachgeordneten Objektivteilen bzw. zur Bildebene die optische Achse und den ersten Strahlabschnitt kreuzt. Diese Strahlführung ist typisch für die eingangs erwähnten h-Designs.

Bei vielen vorteilhaften Ausführungsformen hat das Projektionsobjektiv nur einen einzigen Konkavspiegel. Es sind jedoch auch Ausführungsformen mit mehr als einem Konkavspiegel möglich. Solche Ausführungsformen können mehrere katadioptrische Objektivteile enthalten, von denen einer oder mehrere die gekreuzte Strahlführung aufweisen können.

Es kann günstig sein, wenn das Projektionsobjektiv zusätzlich zu dem ersten Faltungsspiegel mindestens einen zweiten Faltungsspiegel aufweist. Zusätzliche Faltungsspiegel können dazu genutzt werden, Objektebene und Bildebene parallel zueinander auszurichten. Zusätzliche Faltungsspiegel sind auch dann erforderlich, wenn weitere katadioptrische Objektivteile mit geometrischer Strahlteilung vorgesehen sind. Im

Rahmen der Erfindung gibt es Ausführungsformen mit einem oder mehreren katadioptrischen Objektivteilen.

Der erste und der zweite Faltungsspiegel können an einem gemeinsamen Träger angebracht sein. Vorzugsweise sind der erste und der zweite Faltungsspiegel gesonderte Faltungsspiegel, die in gesonderten Fassungen montiert und gegebenenfalls getrennt voneinander einstellbar bzw. justierbar sind. Die Faltungsspiegel können an unterschiedlichen Seiten der optischen Achse angebracht sein. Die Faltungsspiegel können an einander gegenüberliegenden Seiten der Fassungskonstruktion des Projektionsobjektivs mit Hilfe von kompakten Befestigungskonstruktionen stabil befestigt sein. Eine gesonderte Fassung der Faltungsspiegel kann auch im Hinblick darauf vorteilhaft sein, dass in der Regel nur eine der Spiegelkanten im Hinblick auf die Strahlvignettierung kritisch ist. Diese kann bei gesonderter Fassung von Faltungsspiegeln günstig positioniert werden.

Erfindungsgemäße Projektionsobjektive können ein oder mehrere reelle Zwischenbilder haben. Im Bereich eines Zwischenbildes existiert ein lokales Minimum des Strahlbündeldurchmessers, so dass es in der Regel günstig ist, einen Faltungsspiegel geometrisch und/oder optisch in der Nähe eines Zwischenbildes anzubringen. Bei einer Ausführungsform hat der erste Faltungsspiegel eine der optischen Achse nahe innere Spiegelkante und ein Zwischenbild ist in geometrischer Nähe der inneren Spiegelkante angeordnet. Das Zwischenbild kann das einzige Zwischenbild des Projektionsobjektivs sein, welches vorzugsweise eine für die 1-Faltung typische Strahlfaltungsgeometrie hat. Der geometrische Abstand zwischen dem Zwischenbild und der inneren Spiegelkante beträgt vorzugsweise weniger als 30% oder weniger als 20% oder weniger als 10% der meridionalen Ausdehnung des Zwischenbildes.

Bei manchen Ausführungsformen, insbesondere bei Ausführungsformen mit 1-Faltung, hat der erste Faltungsspiegel eine der optischen Achse nahe innere Spiegelkante und ein Zwischenbild ist in einem geometrischen Raum zwischen der inneren Spiegelkante und der Objektebene angeordnet. Bei diesen Ausführungsformen ist es möglich, dass sich das Strahlbündel zwischen dem ersten Faltungsspiegel und der diesem geometrisch vorgelagerten Feldebene und/oder einer dem Faltungsspiegel geometrisch vorgelagerten optischen Komponente vignettierungsfrei „hindurchzwängen“ kann.

10

Die vorgelagerte Feldebene ist bei manchen Ausführungsformen die Objektebene. Bei anderen Ausführungsformen können dem katadioptrischen Objektivteil, der die gekreuzte Strahlführung aufweist, ein oder mehrere refraktive und/oder katadioptrische Abbildungssysteme vorgeschaltet sein, so dass die vorgeschaltete Feldebene eine Zwischenbildebene des Projektionsobjektivs ist.

15

Es kann günstig sein, wenn das mindestens eine Zwischenbild in optischer Nähe eines Faltungsspiegels angeordnet ist. Eine optische Nähe zu einem Faltungsspiegel ist insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass zwischen dem Zwischenbild und dem nächstliegenden Faltungsspiegel keine Linse und auch kein anderes optisches Element angeordnet ist. Manchmal ist ein Zwischenbild in optischer Nähe eines zweiten, für die Strahlbündeltrennung nicht notwendigen Faltungsspiegels angeordnet. Eine Anordnung eines Zwischenbildes derart, dass zumindest ein Teil des Zwischenbildes auf eine Spiegelfläche eines Faltungsspiegels fällt, sollte dagegen vermieden werden, da dies dazu führen kann, dass gegebenenfalls vorhandene Fehler der Spiegelfläche scharf in die Bildebene abgebildet werden. Ein Abstand zwischen

20

25

30

Eine Klasse erfindungsgemäßer Projektionsobjektive hat nur ein einziges reelles Zwischenbild sowie einen einzigen Konkavspiegel und zwei Faltungsspiegel, die für eine parallele Ausrichtung von Objektebene und Bildebene ausgerichtet sind. Dabei ist sowohl eine h-Faltung als auch
5 eine 1-Faltung möglich.

Andere Ausführungsformen haben zwei oder mehr reelle Zwischenbilder, insbesondere mindestens drei reelle Zwischenbilder. Ausführungsformen mit mindestens drei reellen Zwischenbildern haben einen ersten
10 Objektivteil zur Abbildung des Objektfeldes in ein erstes reelles Zwischenbild, einen zweiten Objektivteil zur Erzeugung eines zweiten reellen Zwischenbildes mit der von dem ersten Objektivteil kommenden Strahlung, einen dritten Objektivteil zur Erzeugung eines dritten reellen Zwischenbildes aus der vom zweiten Objektivteil kommenden Strahlung
15 sowie einen vierten Objektivteil zur Abbildung des dritten reellen Zwischenbildes in die Bildebene.

Bei bevorzugten Systemen wird das dritte Zwischenbild direkt, d.h. ohne Erzeugung weiterer Zwischenbilder, in die Bildebene abgebildet, so dass
20 genau drei reelle Zwischenbildern vorliegen.

Der erste Objektivteil kann als Relaissystem dienen, um aus der von der Objektebene kommenden Strahlung ein erstes Zwischenbild mit einem vorgebbaren Korrektionszustand an geeigneter Position zu erzeugen.
25

Vorzugsweise sind mindestens zwei der Objektivteile katadioptrisch und haben jeweils einen Konkavspiegel. Insbesondere können genau zwei katadioptrische Objektivteile vorgesehen sein.

30 Bei einer Weiterbildung sind der zweite Objektivteil und der dritte Objektivteil als katadioptrische Systeme mit jeweils einem Konkavspiegel ausgelegt. Jedem der Konkavspiegel ist ein Faltungsspiegel

zugeordnet, um entweder die Strahlung zum Konkavspiegel umzulenken oder die vom Konkavspiegel kommende Strahlung in Richtung eines nachfolgenden Objektivteils umzulenken.

- 5 Der vierte Objektivteil ist vorzugsweise rein refraktiv und kann zur Erzeugung hoher bildseitiger numerischer Aperturen (NA) optimiert sein.

Bevorzugte Ausführungsformen umfassen vier Objektivteile, die in einer kreuzförmigen Anordnung gruppiert sind, wobei an einer oder mehreren
10 Stellen des komplex gefalteten Strahlenganges Kreuzungsbereiche entstehen können, in denen sich ein von der Objektebene zu einem Konkavspiegel verlaufender erster Strahlabschnitt und ein von dem Konkavspiegel zur Bildebene verlaufender zweiter Strahlabschnitt überkreuzen.

15 Die Bereitstellung von mindestens zwei katadioptrischen Teilsystemen hat große Vorteile. Um wesentliche Nachteile von Systemen mit nur einem katadioptrischen Teilsystem zu erkennen, muss man überlegen, wie in einem katadioptrischen Objektivteil die Korrektur der Petzvalsumme und der chromatischen Aberrationen vorgenommen wird. Der
20 Beitrag einer Linse zur chromatischen Längsaberration CHL ist gegeben durch

$$CHL \propto h^2 \cdot \varphi \cdot \nu$$

25 d.h. sie ist proportional zur Randstrahlhöhe h (ins Quadrat), der Brechkraft φ der Linse und der Dispersion ν des Materials. Andererseits hängt der Beitrag einer Fläche zur Petzvalsumme nur von der Flächenkrümmung und dem Brechzahlprung (der bei einem Spiegel –2
30 beträgt) ab.

Um den Beitrag der katadioptrischen Gruppe zur chromatischen Korrektur groß werden zu lassen, benötigt man also große Randstrahlhöhen (d.h. große Durchmesser), um den Beitrag zur Petzvalkorrektur groß werden zu lassen große Krümmungen (d.h. kleine Radien, die am zweckmäßigsten mit kleinen Durchmessern erreicht werden). Diese beiden Forderungen widersprechen sich.

Die sich entgegenstehenden Forderungen nach Petzvalkorrektur (d.h. Korrektur der Bildfeldkrümmung) und chromatischer Korrektur können durch Einführung (mindestens) eines weiteren katadioptrischen Teils in das System gelöst werden.

Man kann die beiden katadioptrischen Systeme derart asymmetrisch auslegen, daß eines tendenziell große Durchmesser mit flachen Radien zur CHL-Korrektur, und das andere tendenziell kleine Durchmesser mit krummen Radien zur Petzvalkorrektur aufweist. Ein symmetrischer Aufbau ist ebenfalls möglich und kann im Hinblick auf einfache Fertigung günstig sein.

Generell besteht der Freiheitsgrad, die Korrektur dieser und anderer Bildfehler gleichmäßig oder ungleichmäßig auf zwei (oder mehr) katadioptrische Teilsysteme zu verteilen. Hierdurch sind bei entspanntem Aufbau höchste Aperturen mit hervorragendem Korrektionszustand realisierbar.

25

Die Erfindung ermöglicht es, katadioptrische Projektionsobjektive bereitzustellen, bei denen auch bei höchsten numerischen Aperturen der zu korrigierende geometrische Lichtleitwert nicht zu groß wird. Der geometrische Lichtleitwert (oder Etendue) ist hier definiert als Produkt der bildseitigen numerischen Apertur und der Feldgröße. Bei manchen Ausführungsformen beträgt ein Diagonalverhältnis zwischen der Länge der Diagonale eines zur optischen Achse zentrierten, das Objektfeld

einschließenden Minimalkreises (Überfelddiagonale) und der Länge einer Diagonale des Objektfeldes weniger als 1,5, insbesondere weniger als 1,4 oder weniger als 1,3 oder weniger als 1,2

- 5 Die Erfindung ermöglicht es, gut korrigierbare, katadioptrische Projektionsobjektive bereitzustellen, die bei kompakter Bauform und mechanisch stabilem Aufbau höchste numerische Aperturen erreichen können. Es gibt Ausführungsformen, die als „Trockenobjektive“ ausgelegt sind. Trockenobjektive zeichnen sich dadurch aus, dass sie dafür ausgelegt
- 10 sind, dass im Betrieb zwischen der Austrittsseite des Projektionsobjektivs und der Einkoppelfläche eines zu belichtenden Gegenstandes, beispielsweise eines Wafers, ein mit Gas gefüllter Spalt vorliegt, dessen Spaltbreite typischerweise deutlich größer als die Arbeitswellenlänge ist. Bei solchen Systemen sind die erzielbaren numerischen Aperturen auf
- 15 Werte $NA < 1$ beschränkt, da bei Annäherung an den Wert $NA = 1$ an der Austrittsfläche Totalreflexionsbedingungen auftreten, die eine Auskopplung von Beleuchtungslicht aus der Austrittsfläche verhindern. Die bildseitige numerische Apertur beträgt bei bevorzugten Ausführungsformen von Trockensystemen $NA > 0,8$, wobei auch $NA \geq 0,85$ oder
- 20 $NA \geq 0,9$ möglich ist.

- Im Rahmen der Erfindung sind auch katadioptrische Projektionsobjektive möglich, die als Immersionsobjektive ausgelegt sind. Bei der Immersions-Lithografie wird bekanntlich die erzielbare Auflösung eines Belich-
- 25 tungsprozesses dadurch verbessert, dass in den Raum zwischen dem letzten optischen Element des Projektionsobjektivs und dem Substrat ein Immersionsmedium mit hohem Brechungsindex eingebracht wird, beispielsweise eine Immersionsflüssigkeit, die bei der Arbeitswellenlänge einen Brechungsindex $n_1 \geq 1,3$ hat. Dadurch sind Projektions-
- 30 objektive bzw. Abbildungen mit einer bildseitigen numerischen Apertur $NA > 1,0$ möglich, wobei vorzugsweise $NA \geq 1,1$ oder $NA \geq 1,2$ oder $NA \geq 1,3$ möglich sind.

Der optische Aufbau erlaubt auch eine Verwendung für die berührungslose Nahfeld-Projektionslithografie. Dabei ist eine Einkopplung von ausreichend Lichtenergie in das zu belichtende Substrat über einen mit Gas gefüllten Spalt möglich, wenn im zeitlichen Mittel ein ausreichend geringer bildseitiger Arbeitsabstand eingehalten wird. Dieser sollte unterhalb des Vierfachen der verwendeten Arbeitswellenlänge liegen, insbesondere unterhalb der Arbeitswellenlänge. Besonders günstig ist es, wenn der Arbeitsabstand weniger als die Hälfte der Arbeitswellenlänge beträgt, beispielsweise weniger als ein Drittel, ein Viertel oder ein Fünftel der Arbeitswellenlänge. Bei diesen kurzen Arbeitsabständen kann eine Abbildung im optischen Nahfeld erfolgen, bei der evaneszente Felder, die in unmittelbarer Nähe der letzten optischen Fläche des Abbildungssystems existieren, zur Abbildung genutzt werden.

Damit umfasst die Erfindung auch ein berührungsloses Projektionsbelichtungsverfahren, bei dem evaneszente Felder des Belichtungslichtes, die sich in unmittelbarer Nähe der Austrittsfläche befinden, für den lithografischen Prozess nutzbar gemacht werden. Dabei können bei ausreichend geringen (endlichen) Arbeitsabständen trotz geometrischer Totalreflexionsbedingungen an der letzten optischen Fläche des Projektionsobjektivs ein für die Lithografie nutzbarer Lichtanteil aus der Austrittsfläche des Objektivs ausgekoppelt und in eine unmittelbar mit Abstand benachbarte Einkoppelfläche eingekoppelt werden.

Ausführungsformen für die kontaktlose Nahfeld-Projektionslithografie haben vorzugsweise typische Arbeitsabstände im Bereich der Arbeitswellenlänge oder darunter, beispielsweise zwischen ca. 3nm und ca. 200nm, insbesondere zwischen ca. 5nm und ca. 100nm. Der Arbeitsabstand sollte an die sonstigen Eigenschaften des Projektionssystems (Eigenschaften des Projektionsobjektivs nahe der Austrittsfläche, Eigenschaften des Substrates nahe der Einkoppelfläche) so angepasst sein,

dass im zeitlichen Mittel ein Einkoppelwirkungsgrad von mindestens 10% erzielt wird.

Im Rahmen der Erfindung ist somit ein Verfahren zur Herstellung von
5 Halbleiterbauelementen und dergleichen möglich, bei dem ein endlicher
Arbeitsabstand zwischen einer dem Projektionsobjektiv zugeordneten
Austrittsfläche für Belichtungslicht und einer dem Substrat zugeordneten
Einkoppelfläche für Belichtungslicht eingestellt wird, wobei der Arbeits-
abstand innerhalb eines Belichtungszeitintervalles mindestens zeitweise
10 auf einen Wert eingestellt wird, der kleiner ist als eine maximale
Ausdehnung eines optischen Nahfeldes des aus der Austrittsfläche
austretenden Lichts.

Die vorstehenden und weitere Merkmale gehen außer aus den Ansprü-
15 chen auch aus der Beschreibung und aus den Zeichnungen hervor,
wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren
in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfin-
dung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie
für sich schutzfähige Ausführungsformen darstellen können.

20

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Projektionsbelich-
tungsanlage für die Immersions-Lithografie mit einer Ausführ-
25 rungsform eines erfindungsgemäßen katadioptrischen Projek-
tionsobjektivs;

Fig. 2 ist ein Linsenschnitt durch eine erste Ausführungsform eines
erfindungsgemäßen katadioptrischen Immersionsobjektivs mit
30 geometrischem Strahlteiler und 1-Faltung;

- Fig. 3 ist ein schematisches Diagramm, das ein exzentrisch zur optischen Achse angeordnetes, rechteckiges Objektfeld und ein kreisförmiges, zu korrigierendes Überfeld zeigt;
- 5 Fig. 4 zeigt das in Fig. 2 gezeigte Projektionsobjektiv in einer zum Vergleich mit Fig. 5 geeigneten Darstellung;
- Fig. 5 zeigt ein katadioptrisches Projektionsobjektiv mit gleichem optischen Aufbau wie in Fig. 4, jedoch mit herkömmlichem geometrischen Strahlteiler.
- 10
- Fig. 6 zeigt eine weitere Ausführungsform eines katadioptrischen Projektionsobjektivs mit geometrischem Strahlteiler und 1-Faltung, welches für berührungslose Nahfeld-Lithografie ausgelegt ist;
- 15
- Fig. 7 zeigt eine Detailansicht des Bereich von Faltungsspiegeln einer anderen Ausführungsform eines erfindungsgemäßen, katadioptrischen Projektionsobjektivs mit geometrischer Strahlteilung;
- 20
- Fig. 8 zeigt eine Ausführungsform eines katadioptrischen Trockenobjektivs mit geometrischer Strahlteilung und h-Faltung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung;
- 25 Fig. 9a zeigt eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Immersions-Projektionsobjektivs mit drei Zwischenbildern mit Kreuzform und asymmetrischem Aufbau von zwei katadioptrischen Objektivteilen;
- 30 Fig 9b zeigt eine Detailansicht der Faltungseinrichtung in Fig. 8

Fig. 10 zeigt eine Variante des in Fig. 9a gezeigten Systems mit schrägen Horizontalarmen;

Fig. 11 zeigt eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Trockensystems mit drei Zwischenbildern und Kreuzform;

5

Fig. 12 zeigt eine Faltungseinrichtung mit Prisma

Fig. 13 zeigt eine andere Ausführungsform eines kreuzförmig aufgebauten Projektionsobjektivs mit weitgehend symmetrischem Aufbau;

10

Fig. 14 zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Projektionsobjektivs mit einem zwischen zwei katadioptrischen Objektivteilen angeordneten Relaissystem;

15

Fig. 15 zeigt eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Projektionsobjektivs mit entkoppelten optischen Achsen der katadioptrischen Objektivteile;

20 Fig. 16 zeigt eine weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Projektionsobjektivs mit entkoppelten optischen Achsen der katadioptrischen Objektivteile;

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

25

Bei der folgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen bezeichnet der Begriff „optische Achse“ eine gerade Linie oder eine Folge von geraden Linienabschnitten durch die Krümmungsmittelpunkte der optischen Komponenten. Die optische Achse wird an Faltungsspiegeln (Umlenkspiegeln) oder anderen reflektierenden Flächen gefaltet. Richtungen und Abstände werden als „bildseitig“

30

beschrieben, wenn sie in Richtung der Bildebene bzw. des dort befindlichen zu belichtenden Substrats gerichtet sind und als „objektseitig“, wenn sie im Bezug auf die optische Achse zur Objektebene bzw. einem dort befindlichen Retikel gerichtet sind. Das

5 Objekt ist in den Beispielen eine Maske (Retikel) mit dem Muster einer integrierten Schaltung, es kann sich auch um ein anderes Muster, beispielsweise eines Gitters, handeln. Das Bild wird in den Beispielen auf einen mit einer Photoresistschicht versehenen Wafer projiziert, der als Substrat dient. Es sind auch andere Substrate, beispielsweise

10 Elemente für Flüssigkeitskristallanzeigen oder Substrate für optische Gitter möglich.

In Fig. 1 ist schematisch eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage in Form eines Wafer-Steppers 1 gezeigt, der zur Herstellung von hochintegrierten Halbleiterbauelementen mittels Immersions-

15 Lithografie vorgesehen ist. Die Projektionsbelichtungsanlage 1 umfasst als Lichtquelle einen Excimer-Laser 2 mit einer Arbeitswellenlänge von 193 nm, wobei auch andere Arbeitswellenlängen, beispielsweise 157 nm oder 248 nm möglich sind. Ein nachgeschaltetes Beleuchtungssystem 3

20 erzeugt in seiner Austrittsebene 4 ein großes, scharf begrenztes, sehr homogen beleuchtetes und an die Telezentriererfordernisse des nachgeschalteten Projektionsobjektivs 5 angepasstes Beleuchtungsfeld. Das Beleuchtungssystem 3 hat Einrichtungen zur Auswahl des Beleuchtungsmodus und ist im Beispiel zwischen konventioneller Beleuchtung

25 mit variablem Kohärenzgrad, Ringfeldbeleuchtung und Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung umschaltbar.

Hinter dem Beleuchtungssystem ist eine Einrichtung 40 (Reticle-Stage) zum Halten und Manipulieren einer Maske 6 so angeordnet, dass diese

30 in der Objektebene 4 des Projektionsobjektivs 5 liegt und in dieser Ebene zum Scanbetrieb in einer Abfahrriichtung 7 (y-Richtung) bewegbar ist.

Hinter der auch als Maskenebene bezeichneten Ebene 4 folgt das katadioptrische Reduktionsobjektiv 5, das ein Bild der Maske mit reduziertem Massstab von 4:1 auf einen mit einer Photoresistschicht belegten Wafer 10 abbildet. Andere Reduktionsmassstäbe, z.B. 5:1 oder 10:1 oder 100:1 oder darunter, sind ebenfalls möglich. Der als lichtempfindliches Substrat dienende Wafer 10 ist so angeordnet, dass die ebene Substratoberfläche 11 mit der Photoresistschicht im wesentlichen mit der Bildebene 12 des Projektionsobjektivs 5 zusammenfällt.

Der Wafer wird durch eine Einrichtung 50 (Wafer-Stage) gehalten, die einen Scannerantrieb umfasst, um den Wafer synchron mit der Maske 6 parallel zu dieser zu bewegen. Die Einrichtung 50 umfasst auch Manipulatoren, um den Wafer sowohl in z-Richtung parallel zur optischen Achse 13 des Projektionsobjektivs, als auch in x- und y-Richtung senkrecht zu dieser Achse zu verfahren. Eine Kippeinrichtung mit mindestens einer senkrecht zur optischen Achse 13 verlaufenden Kippachse ist integriert.

Die zum Halten des Wafers 10 vorgesehene Einrichtung 50 ist für die Verwendung bei der Immersions-Lithografie konstruiert. Sie umfasst eine von einem Scannerantrieb bewegbare Aufnahmeeinrichtung 15, deren Boden eine flache Ausnehmung zur Aufnahme des Wafers 10 aufweist. Durch einen umlaufenden Rand 16 wird eine flache, nach oben offene, flüssigkeitsdichte Aufnahme für ein flüssiges Immersionsmedium gebildet, das durch nicht gezeigte Einrichtungen in die Aufnahme eingeleitet und aus dieser abgeleitet werden kann. Die Höhe des Rands ist so bemessen, dass das eingefüllte Immersionsmedium die Oberfläche 11 des Wafers 10 vollständig bedecken und der austrittsseitige Endbereich des Projektionsobjektivs 5 bei richtig eingestelltem Arbeitsabstand zwischen Objektivaustritt und Waferoberfläche in die Immersionsflüssigkeit eintauchen kann.

Fig. 2 zeigt eine erste Ausführungsform eines für die Immersions-Lithografie ausgelegten, katadioptrischen Reduktionsobjektivs 100 mit geometrischer Strahlteilung. Es dient dazu, ein in seiner Objektebene 101 angeordnetes Muster eines Retikels oder dergleichen unter

5 Erzeugung eines einzigen reellen Zwischenbildes 102 in eine parallel zur Objektebene ausgerichtete Bildebene 103 in reduziertem Maßstab abzubilden, beispielsweise im Verhältnis 4:1. Das Objektiv hat zwischen der Objektebene 101 und der Bildebene 103 einen katadioptrischen

10 Objektivteil 104, der einen Konkavspiegel 105 und einen ersten, ebenen Faltungsspiegel 106 umfasst, sowie einen im Lichtweg hinter dem katadioptrischen Objektivteil folgenden, rein refraktiven, dioptrischen

Objektivteil 107. Zwischen dem Zwischenbild 102 und der ersten Linse des refraktiven Objektivteils 107 ist ein zweiter Faltungsspiegel 108 angeordnet, dessen Spiegelfläche in einer Ebenen liegt, die senkrecht

15 zur Ebenen der Spiegelfläche des Faltungsspiegels 106 ausgerichtet ist. Der erste Faltungsspiegel 106 hat eine der optischen Achse 110 überwiegend abgewandte Spiegelfläche, die dazu dient, die von der Objektebene kommende Strahlung in Richtung des Konkavspiegels 105 umzulenken. Der zweite Faltungsspiegel 108, der geometrisch näher an

20 der Objektebene 101 sitzt als der erste Faltungsspiegel 106, ist so angeordnet und ausgerichtet, dass er die vom Konkavspiegel kommende Strahlung in Richtung der Bildebene 103 umlenkt. Während der erste Faltungsspiegel 106 für die Strahlumlenkung zum Konkavspiegel 105 notwendig ist, kann der zweite Faltungsspiegel 108 auch entfallen.

25 Dann würden, ohne weitere Umlenkspiegel, die Objektebene und die Bildebene im Wesentlichen senkrecht zueinander stehen.

Der erste Faltungsspiegel 106 ist gegenüber der optischen Achse 110 in einem Neigungswinkel von ca. 40° geneigt, so dass der den Konkav-

30 spiegel 105 tragende Seitenarm (Horizontalarm, HOA) des Projektionsobjektivs gegenüber dem senkrecht auf Objekt- und Bildebene stehenden Teilen der optischen Achse um ca. 100° geneigt ist. Dadurch ist

sichergestellt, dass der Bereich des Konkavspiegels nicht in den Bereich der für die Retikelhalterung vorgesehenen Einrichtungen hineinragt.

Ein erster Strahlabschnitt 120 führt von der Objektebene 101 zum
5 Konkavspiegel 105 und wird am ersten Faltungsspiegel 106 gefaltet. Ein
zweiter Strahlabschnitt 130 führt vom Konkavspiegel 105 zur Bildebene
103 und wird am zweiten Faltungsspiegel 108 gefaltet. Das Zwischen-
bild 102 liegt in unmittelbarer Nähe der der optischen Achse 110 nahen
und der Objektebene 101 zugewandten, inneren Spiegelkante 115 des
10 ersten Faltungsspiegels im Bauraum zwischen der inneren Spiegelkante
115 und der Retikelebene derart günstig, dass das zum Zwischenbild
102 konvergierende und dahinter wieder divergierende Strahlbündel des
zweiten Strahlabschnittes den ersten Faltungsspiegel ohne Beschnei-
dung durch diesen passieren kann. Wie aus Fig. 2 ersichtlich ist, ist
15 dabei der minimale geometrische Abstand zwischen der inneren
Spiegelkante 115 und dem Strahlbündel im Bereich des Zwischenbildes
deutlich kleiner als der in der Schnittebene der Darstellung liegende
Durchmesser des Zwischenbildes und beträgt weniger als ca. 20%
dieses Durchmessers. Da der Abbildungsmaßstab des den katadiop-
20 trischen Objektivteil umfassenden ersten Abbildungssystems, welches
das Zwischenbild erzeugt, nahe bei $\beta = 1$ liegt, entspricht dieser Durch-
messer im Wesentlichen der Breite des Objektfeldes in Abfahr-
richtung bzw. Scanrichtung 7 (y-Richtung). In optischer Hinsicht liegt das Zwi-
schenbild 102 in unmittelbarer Nähe des zweiten Faltungsspiegels 108,
25 wobei zwischen dem Zwischenbild und dem zweiten Faltungsspiegel
keine Linse angeordnet ist.

Das Projektionsobjektiv 100 stellt eine vorteilhafte Variante der eingangs
erläuterten 1-Faltung dar, bei der das Zwischenbild geometrisch zwi-
30 schen der Objektebene bzw. dem Retikel und dem ersten Faltungs-
spiegel 106 liegt und die Strahlumlenkung mit Hilfe von zwei separaten
Spiegeln durchgeführt wird. Weiter unten wird näher erläutert, wie durch

diese ungewöhnliche Faltungsanordnung der zu korrigierende Lichtleitwert bzw. die Überfeldgröße des Gesamtsystems auch bei höchsten numerischen Aperturen klein gehalten werden kann.

5 Im Betrieb des Projektionssystems tritt das Licht aus dem Beleuchtungssystem auf der bildabgewandten Seite der Objektebene 101 in das Projektionsobjektiv ein und durchtritt zunächst die in der Objektebene angeordnete Maske. Das transmittierte Licht durchtritt dann eine planparallele Eintrittsplatte 151 und eine zwischen dieser und dem ersten
10 Faltungsspiegel angeordnete, als Halblinse ausgeführte Positiv-Meniskuslinse 152 mit bildseitiger Konkavfläche. Nach Umlenkung am ersten Faltungsspiegel 106 wird eine zwischen Faltungsspiegel und Konkavspiegel in der Nähe des ersten Faltungsspiegels angeordnete Positiv-Meniskuslinse 153 mit einer dem Faltungsspiegel zugewandten,
15 sphärischen, konkaven Eintrittsfläche und einer asphärischen Austrittsfläche durchlaufen, bevor eine Spiegelgruppe 175 erreicht wird. Die Spiegelgruppe 175 umfasst zwei dem Konkavspiegel 105 unmittelbar vorangestellte Negativ-Meniskuslinsen 154, 155, deren konvexe bzw. erhabene Flächen jeweils zum Konkavspiegel 105 weisen, sowie den
20 Konkavspiegel 105 selbst. Das vom Konkavspiegel 105 reflektierte und durch die zweifach durchlaufenden Linsen 155, 154 und 153 zurückgeführte Licht bildet dann in unmittelbarer Nähe der objektzugewandten Spiegelkante 115 des ersten Faltungsspiegels das reelle Zwischenbild 102.

25

Die Linsen des refraktiven Objektivteils 107 können funktional in eine Transfergruppe T und eine Fokussiergruppe F unterteilt werden und dienen gemeinsam dazu, dass unmittelbar vor dem zweiten Faltungsspiegel 108 entstehende Zwischenbild in reduziertem Maßstab in die
30 Bildebene 103 abzubilden. Die Transfergruppe umfasst drei unmittelbar aufeinander folgende bikonvexe Positivlinsen 156 bis 158 und eine

nachfolgende Negativ-Meniskuslinse 159 mit objektseitiger Konkavfläche.

Die mit Abstand folgende Fokussiergruppe eröffnet mit einer bikonkaven
5 Negativlinse 160 mit stark negativer Brechkraft, die eine starke Strahlaufweitung bewirkt und aufgrund hoher Inzidenzwinkel der Strahlung an ihrer Austrittsseite wirksam zur Korrektur von Bildfehlern beiträgt. Die drei folgenden Positivlinsen 161, 162, 163 mit asphärischen Eintrittsflächen und sphärischen Austrittsflächen leiten die Strahlzusammenführung ein. Im Bereich der Systemblende 180 sitzt ein Negativ-
10 Meniskus 164 mit bildseitiger Konkavfläche. Danach folgen nur noch Positivlinsen 165 bis 169, die wesentlich zur Erzeugung der hohen bildseitigen numerischen Apertur beitragen. Das letzte optische Element vor der Bildebene 103 wird durch eine Plankonvexlinse 169 gebildet,
15 deren ebene Austrittsseite in einem Arbeitsabstand von 2mm vor der Bildebene 103 sitzt. Im Betrieb ist der schmale Spalt mit einem Immersionsmedium 190 gefüllt. Im Beispielsfall wird als Immersionsflüssigkeit Reinstwasser mit einem Brechungsindex $n_i = 1,437$ (193nm) verwendet.

20

In Tabelle 1 ist die Spezifikation des Designs in tabellarischer Form zusammengefasst. Dabei gibt Spalte 1 die Nummer der brechenden, reflektierenden oder auf andere Weise ausgezeichneten Fläche, Spalte 2 den Radius r der Fläche (in mm), Spalte 3 den als Dicke bezeichneten
25 Abstand d der Fläche zur nachfolgenden Fläche (in mm), Spalte 4 das Material eines Bauelementes und Spalte 5 die Brechzahl n . Den Brechungsindex des Materials des Bauelementes an, das der angegebenen Eintrittsfläche folgt. Spalte 6 zeigt die maximal nutzbaren halben Durchmesser in mm. Die Baulänge L des Objektivs zwischen
30 Objekt und Bildebene beträgt ca. 930 mm.

Bei der Ausführungsform sind neun der Flächen, nämlich die Flächen 5, 8 = 19, 10 = 17, 12 = 14, 27, 33, 35, 37 und 47 asphärisch. Tabelle 2 gibt die entsprechenden Asphärendaten an, wobei sich die Pfeilhöhen der asphärischen Flächen nach folgender Vorschrift berechnen:

5

$$p(h)=[((1/r)h^2)/(1+\text{SQRT}(1-(1+K)(1/r)^2h^2))]+C1\cdot h^4+C2\cdot h^6+....$$

10 Dabei gibt der Kehrwert $(1/r)$ des Radius die Flächenkrümmung im Flächenscheitel und h den Abstand eines Flächenpunktes von der optischen Achse an. Somit gibt $p(h)$ diese Pfeilhöhe, d. h. den Abstand des Flächenpunktes vom Flächenscheitel in z -Richtung, d. h. in Richtung der optischen Achse. Die Konstanten $K, C1, C2 \dots$ sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

15 Das Immersionssystem 100 ist für eine Arbeitswellenlänge von ca. 193 nm ausgelegt, bei der das für alle Linsen verwendete synthetische Quarzglas (SiO_2) einen Brechungsindex $n = 1,5602$ hat. Es ist an Reinstwasser als Immersionsmedium ($n_i = 1,4367$ bei 193nm) angepasst und hat einen bildseitigen Arbeitsabstand von 2mm. Die
20 bildseitige numerische Apertur NA beträgt 1,1, der Abbildungsmaßstab 4:1. Das System ist für ein Bildfeld der Größe $26 \times 5,5 \text{ mm}^2$ ausgelegt und ist doppelt telezentrisch. Das Diagonalverhältnis zwischen der Länge einer Diagonale eines zur optischen Achse zentrierten, das Objektfeld einschließenden Minimalkreises und der Länge einer
25 Diagonale des Objektfeldes (vgl. Fig. 3) beträgt ca. 1,26.

Einige Besonderheiten des Projektionsobjektivs werden anhand der Figuren 3 bis 5 näher erläutert. Dabei zeigt Fig. 3 eine schematische Darstellung der Dimensionierung von Objektfeld und Überfeld in der
30 Objektebene des Projektionsobjektivs, Fig. 4 eine Faltungsgeometrie bei einem erfindungsgemäßen Projektionsobjektiv mit geometrischem Strahlteiler und 1-Faltung (vgl. Fig. 2) und Fig. 5 eine schematische

Darstellung des Strahlungsverlaufs und der Faltungsgeometrie bei einem ähnlichen Projektionsobjektiv ohne gekreuzten Strahlengang.

Aufgrund der geometrischen Strahlteilung hat das Projektionsobjektiv
5 ein außeraxial angeordnetes Objektfeld 200, wobei zwischen der optischen Achse 210 und dem Objektfeld ein endlicher Objektfeldabstand h besteht. Das Objektfeld des Waferscanners ist rechteckförmig bzw. schlitzförmig mit einem hohen Aspektverhältnis und ist gekennzeichnet durch die Länge seiner Diagonale 201 (Schlitzdiagonale). Um dieses
10 außeraxiale Objektfeld aberrationsarm abbilden zu können, ist es erforderlich, das Projektionsobjektiv für eine Feldgröße zu korrigieren, die deutlich größer ist als das Objektfeld selbst. Dieses kreisförmige Überfeld 202, das von einem um die optische Achse 210 zentrierte Minimalkreis um das exzentrische Objektfeld umschlossen wird, kann
15 durch die Länge seiner Diagonale 203 definiert werden, die hier als Überfelddiagonale bezeichnet wird. Es ist für den Fachmann ersichtlich, dass das Diagonalverhältnis zwischen der Länge der Überfelddiagonale und der Länge der Schlitzdiagonale möglichst nahe bei 1 liegen sollte, um bei außeraxialem Objektfeld den geringst möglichen Korrekturaufwand zu haben.
20

Anhand der Figuren 4 und 5 wird die Problemstellung bei der Minimierung des Lichtleitwertes bzw. des Überfelddurchmessers und die Problematik ausreichenden Bauraums in der Nähe der Faltungsspiegel
25 durch einen Vergleich zwischen einer konventionellen 1-Faltung mit zwei an einem Spiegelprisma angebrachten Faltungsspiegeln (Fig. 5) und einer erfindungsgemäßen Ausführungsform mit getrennten Faltungsspiegeln (Fig. 4) erläutert. Dabei entspricht Fig. 4 dem in Fig. 2 gezeigten Objektivaufbau. In beiden dargestellten Faltungsvarianten beträgt
30 die Feldgröße $26 \cdot 5,5 \text{ mm}^2$. Es liegt dasselbe Design zugrunde (vgl. Tabelle 1), d.h. es ist derselbe Objektfeldradius korrigiert. Somit ist in

beiden Faltungsvarianten der Abstand h des Objektfeldes von der optischen Achse (Objektfeldabstand) gleich groß.

Als mechanisches Kriterium für einen Vergleich der beiden Faltungsvarianten sei vorausgesetzt, dass der kleinste Abstand eines Linsenrandes von der Objektebene bzw. Retikelebene ausreichend groß sein soll, um eine Beeinträchtigung der Konstruktion der Retikel-Stage zu vermeiden. Beide Faltungen sind so konzipiert, dass dies auf nahezu gleiche Weise gegeben ist.

10

Es ist zu erkennen, dass bei der in Fig. 4 gezeigten Variante mit überkreuzter Strahlführung die konstruktiv-mechanische Randbedingung eingehalten werden kann. Dazu ist es lediglich notwendig, die erste auf die Objektebene folgende Linse 152 als abgeschnittene Linse auszuführen, damit der zweite Faltungsspiegel 108 nicht mit dieser Linse oder deren Fassung kollidiert. Dies ist in Fig. 2 gezeigt. Es ist erkennbar, dass an den Faltungsspiegeln 106, 108 keine Strahlbeschnidung oder Vignettierung auftritt. Insbesondere ist die Fläche des ersten Faltungsspiegels 106 groß genug, dass die gesamte vom Objekt kommende Strahlung zum Konkavspiegel umgelenkt werden kann und die Spiegelfläche des zweiten Faltungsspiegels reicht aus, um das gesamte vom Zwischenbild kommende Strahlbündel Richtung Bildebene umzulenken. Das Strahlbündel wird auch nicht durch in den Strahlengang hineinragende Teile beschnitten, wozu besonders beiträgt, dass der Bereich minimalen Strahldurchmessers in der Nähe des Zwischenbildes 102 sich mit Abstand zwischen der retikelnächsten Spiegelkante und dem Retikel hindurchzwängen kann.

Bei der konventionellen Faltung (Fig. 5) wäre es dagegen für eine vignettierungsfreie Umlenkung am ersten Faltungsspiegel nötig, dass dieser die erste Linse 152' durchdringt. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass der der Objektebene nächste erste Faltungs-

30

- spiegel 106 auf der gleichen Seite liegt wie das außeraxiale Objektfeld. Genau umgekehrt ist es bei der Faltung gemäß Fig. 4, bei der der objektnächste Faltungsspiegel (der zweite Faltungsspiegel 108) auf der dem Objektfeld gegenüber liegenden Seite der optischen Achse liegt. In
- 5 Fig. 5 ist weiter zu erkennen, dass sich die Lichtstrahlen in der Nähe der Prismenspitze, die durch die achsnahen Spiegelkanten vom ersten und zweiten Faltungsspiegel gebildet wird, überschneiden. Auch dies würde zu einer Vignettierung führen und ist daher nicht realisierbar.
- 10 Um den ersten Konflikt zu beheben, müsste der erste Faltungsspiegel 106 weiter vom Retikel entfernt angebracht werden. Dies würde aber den Faltungsspiegel vergrößern, wodurch der zweite Konflikt in der Nähe der Prismenkante des Faltungsprismas noch verschärft würde. Als Folge dessen muss das Objektfeld weiter außeraxial angebracht werden
- 15 und kann daher (bei unveränderter Größe des Überfeldes) nicht mehr die volle Feldgröße von $25 \cdot 5,5 \text{ mm}^2$ besitzen. Es kann gezeigt werden, dass bei der in Fig. 5 gezeigten Faltungsgeometrie nur ein $16 \cdot 5,5 \text{ mm}^2$ großes Feld bei gleichem korrigiertem Objektfeldradius (d.h. bei gleicher Überfeldgröße) vignettierungsfrei abgebildet werden könnte. Hier zeigt
- 20 sich ein großer Vorteil erfindungsgemäßer Strahlführung.

Anhand von Fig. 6 wird eine weitere Ausführungsform eines katadioptrischen Projektionsobjektivs 500 mit geometrischer Strahlteilung, einem einzigen Konkavspiegel und einem gekreuzten Strahlengang in

25 1-Faltungsgeometrie gezeigt. Der Grundaufbau ist vergleichbar mit der Ausführungsform des Projektionsobjektivs 100 gemäß Fig. 2, weshalb für entsprechende Merkmale die gleichen Bezugszeichen, erhöht um 400, verwendet werden. Die Spezifikation des Designs ergibt sich aus Tabellen 3 und 4.

30

Im Unterschied zur Ausführungsform gemäß Fig. 2 ist zwischen Objektebene 501 und dem ersten Faltungsspiegel 506 eine asphärische,

im Wesentlichen brechkraftlose Linse angeordnet. Der Eintritt des
Objektives wird durch eine planparallele Platte 551 und die darauf
folgende brechkraftarme Ashäre 551' gebildet. Im doppelt durchlaufenen
Strahlengang zwischen dem ersten Faltungsspiegel 506 und
5 Konkavspiegel 505 ist die positive Brechkraft in der Nähe des
Zwischenbildes 502 durch zwei mit Abstand zueinander angeordnete
Positivlinsen 553, 553' bereitgestellt, die gemeinsam mit zwei
unmittelbar vor dem Konkavspiegel angeordneten Negativ-Meniskus-
linsen 554, 555 zu einer Positionierung des Zwischenbildes 502
10 zwischen der objektzugewandten Spiegelkante 515 des ersten Faltungs-
spiegels und der Objektebene beitragen. Optisch unmittelbar hinter dem
Zwischenbild liegt der zweite Faltungsspiegel 508, der aufgrund der
Nähe zum Zwischenbild klein gehalten und daher nahe an die Objekt-
ebene herangerückt werden kann. Die Funktion der Transfergruppe T
15 wird durch eine einzelne Positivlinsen 556 ausgefüllt. Die Fokussier-
gruppe F hat vor der Systemblende 580 einen Positivmeniskus 560 und
einen Negativmeniskus 561 (jeweils mit bildseitiger Konkavfläche), eine
bikonvexe Positivlinsen 562 und einen objektseitig konkaven Meniskus
563 mit schwacher Brechkraft unmittelbar vor der Systemblende.
20 Zwischen dieser und der Bildebene 503 sind nur Positivlinsen 564 bis
567 angeordnet, deren letzte eine Plankonvexlinse mit ebener
Austrittsseite ist. Der bildseitige Arbeitsabstand zwischen der ebenen
Austrittsfläche und der Bildebene ist auf den Wert 0 gesetzt. In dieser
Ausführung ist das Projektionsobjektiv zur Kontakt-
25 Projektionslithographie mittels „solid immersion“ verwendbar. Es ist mit
geringfügigen Modifikationen in ein Immersionssystem mit endlichem
Arbeitsabstand überführbar, dessen Bereich mit einem
Immersionsmedium zu füllen wäre. Wird der Arbeitsabstand z.B. auf
weniger als 100nm und damit nur einen Bruchteil der Arbeitswellenlänge
30 eingestellt, so kann dieses Projektionssystem an eine Verwendung in
der Nahfeld-Lithografie angepasst werden, bei der aus der Austrittsseite

des Objektivs austretende, evaneszente Felder zur Bildgebung genutzt werden.

In Fig. 7 ist der Bereich der zweifachen Strahlfaltung und überkreuzten
5 Strahlführung eines katadioptrischen Projektionsobjektivs 600 mit einem
einzigem Konkavspiegel und 1-Faltung gezeigt. Entsprechende Elemente tragen die gleichen Bezugszeichen wie bei Fig. 2, erhöht um 500.
Wie bei den vorhergehenden Ausführungsformen trifft die von der
Objektebene 601 kommende Strahlung zunächst auf den ersten
10 Faltungsspiegel 606, der die Strahlung von der optischen Achse 610
weg in Richtung des (nicht gezeigten) Konkavspiegels umlenkt, der die
Strahlung zum zweiten Faltungsspiegel 608 reflektiert. Die zur Erzeugung
des Zwischenbildes 602 dienenden optischen Komponenten, zu
denen auch eine im Bauraum zwischen Objektebene und ersten
15 Faltungsspiegel angeordnete Positivlinse 652 gehört, sind so ausgelegt,
dass das Zwischenbild in Lichtlaufrichtung hinter dem zweiten Faltungsspiegel 608
vor der ersten Linse 656 des refraktiven zweiten
Objektivteils liegt. Der geometrische Abstand des Zwischenbildes zu der
achs zugewandten inneren Spiegelkante 615 des ersten Faltungsspiegels
20 beträgt wie bei den Ausführungsformen gemäß Fig. 2 nur einen
Bruchteil von ca. 20 - 30% der meridonalen Ausdehnung des
Zwischenbildes, so dass große geometrische Nähe vorliegt. Im
Unterschied zu den vorherigen Ausführungsformen ist das Zwischenbild
jedoch nicht im Bauraum zwischen der kritischen Spiegelkante 615 und
25 der Objektebene angeordnet, sondern etwa auf axialer Höhe der inneren
Spiegelkante 615 neben dieser. Die überkreuzte Strahlführung des ersten
Strahlabschnittes (zwischen Objektebene 601 und Konkavspiegel) und des
zweiten Strahlabschnittes (zwischen Konkavspiegel und Bildebene) mit einem
Kreuzungsbereich geometrisch zwischen der
30 Positivlinse 652 und dem ersten Faltungsspiegel 606 ermöglicht in
Verbindung mit der Nähe des Zwischenbildes zur kritischen Spiegelkante 615
eine hohe bildseitige numerische Apertur, die im Beispielsfall

NA = 0,8 beträgt. Die Spezifikation dieses Designs im Einzelnen kann der europäischen Patentanmeldung EP 1 115 019 A2 entnommen werden, deren Offenbarungsgehalt durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht wird. (vgl. dortige Fig. 11).

5

Anhand von Fig. 8 wird beispielhaft erläutert, dass die Erfindung auch bei anderen katadioptrischen Projektionsobjektiven mit einem einzigen Konkavspiegel und einem einzigen reellen Zwischenbild mit Vorteil nutzbar ist. Der optische Aufbau des Projektionsobjektivs 700 bezüglich
10 Abfolge und Auslegung der Linsen entlang der optischen Achse kann dem US-Patent US 6,195,213 B1 entnommen werden, welches in Fig. 2 und Tabelle 1 ein entsprechendes optisches System mit konventioneller h-Faltung zeigt. Der diesbezügliche Offenbarungsgehalt wird durch Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht.

15

Das Projektionsobjektiv 700 ist so aufgebaut, dass die von der Objektebene 701 kommende Strahlung zunächst auf den Konkavspiegel 705 trifft, von dem sie in Richtung des ersten Faltungsspiegels 706 reflektiert wird. Dieser ist mit einer der optischen Achse 710 zugewandten Spiegel-
20 fläche so angeordnet, dass die Strahlung in Richtung eines zweiten Faltungsspiegels 708 reflektiert wird, der ohne zwischengeschaltete Linsen folgt und die Strahlung in Richtung der Linsen des refraktiven Objektivteils 707 umlenkt. Da der erste Faltungsspiegel 706 auf der dem refraktiven Objektivteil 707 gegenüber liegenden Seite der optischen
25 Achse 710 liegt und die vom Objektfeld kommende Strahlung auf ihrem Weg zum Konkavspiegel den ersten Umlenkspiegel 706 zunächst auf seiner dem zweiten Objektivteil zugewandten Seite passiert, überkreuzt der vom Konkavspiegel über den Faltungsspiegel 706 zur Bildebene führende zweite Strahlabschnitt den von der Objektebene zum
30 Konkavspiegel führenden ersten Strahlabschnitt in einem Kreuzungsbereich, der zwischen erstem und zweitem Faltungsspiegel in der Nähe

des ersten Faltungsspiegel 706 liegt. Das Zwischenbild 702 entsteht unmittelbar vor dem ersten Faltungsspiegel.

Die überkreuzte Strahlführung bei h-Faltung hat mehrere Vorteile gegenüber der konventionellen Anordnung der Faltungsspiegel. In fassungstechnischer und mechanischer Sicht ist es günstig, dass der erste Faltungsspiegel 706 auf der dem zweiten Objektivteil 707 abgewandten Seite der optischen Achse 710 liegt. Dadurch ist eine stabile Befestigung mit Hilfe einer an der Spiegelrückseite angebrachten, kompakten Befestigungsstruktur an einem Fassungelement möglich, die stabil mit den Linsenfassungen der vor und hinter dem ersten Faltungsspiegel liegenden optischen Komponenten angebracht sein kann. In mechanisch-optischer Hinsicht ist zu beachten, dass bei erfindungsgemäß gekreuzter Strahlführung der erste Faltungsspiegel in Bezug auf den zwischen Objekzebene und Konkavspiegel verlaufenden Teil der optischen Achse auf der dem zweiten Objektivteil 707 abgewandten Seite ist, was einer Anordnung des ersten Faltungsspiegels auf der der Objekzebene abgewandten (unteren) Seite des horizontalen Abschnittes 710' der optischen Achse zwischen erstem Faltungsspiegel und zweitem Faltungsspiegel entspricht. Dieser horizontale Teil 710' der optischen Achse kann bei erfindungsgemäßer Strahlführung deutlich näher an die Retikelebene herangebracht werden als bei der konventionellen h-Faltung, bei der der horizontale Teil der optischen Achse geometrisch zwischen dem ersten Faltungsspiegel und dem Konkavspiegel liegt, also auf dem Retikel abgewandten Seite des ersten Faltungsspiegels. Durch die Verlegung des horizontalen Teiles der optischen Achse in Richtung Objekzebene kann eine Verringerung des geometrischen Lichtleitwertes (Etendue) erreicht werden, da die kritische (innere) Kante des Faltungsspiegels näher an die Retikelebene herangebracht werden kann.

Anhand der folgenden Figuren werden Ausführungsbeispiele erfindungsgemäßer katadioptrischer Projektionsobjektive mit mehr als einem reellen Zwischenbild und mehr als einem Konkavspiegel erläutert. Diese zeichnen sich unter anderem dadurch aus, dass sie bei günstiger Bauform eine gute Korrektur von Bildfehlern ermöglichen, wobei insbesondere eine wirksame Korrektur der Petzvalsumme (d.h. der Bildfeldkrümmung) und von chromatischen Aberrationen bei fertigungstechnisch günstigen Bedingungen erreicht werden kann.

- 10 In Fig. 9a ist eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Projektionsobjektivs mit zwei katadioptrischen Objektivteilen, zwei refraktiven Objektivteilen und genau drei reellen Zwischenbildern gezeigt. Fig. 9b zeigt eine Detailansicht des Bereiches der Strahlumlenkeinrichtung (Faltungseinrichtung). In dieser Darstellung ist der gekreuzte Strahlengang besonders gut zu erkennen.
- 15

Das Immersions-Projektionsobjektiv 800 hat zwischen seiner Objektebene 801 und der Bildebene 803 in dieser Reihenfolge einen ersten dioptrischen Objektivteil 805, einen ersten katadioptrischen Objektivteil 806 mit einem ersten Konkavspiegel 807 und einem zugeordneten Faltungsspiegel 808, einen zweiten katadioptrischen Objektivteil 809 mit einem zweiten Konkavspiegel 810 und einem zugeordneten Faltungsspiegel 812 sowie einen zweiten refraktiven Objektivteil 815. Vom Retikel (Objektebene 801, in der Figur links gezeigt) läuft das Licht durch den ersten refraktiven Objektivteil 805, der ein erstes Zwischenbild 820 erzeugt. Danach trifft das Licht auf den in Lichtlaufrichtung ersten Faltungsspiegel 808, der in der Nähe des ersten Zwischenbildes unmittelbar hinter diesem steht und das Licht in Richtung des ersten Konkavspiegels 807 umlenkt. Der zugeordnete katadioptrische Objektivteil 806, der in der Zeichnung nach unten weist, kann im Betrieb im Wesentlichen horizontal ausgerichtet sein. Solche Objektivteile werden hier auch als Horizontalarm (HOA) bezeichnet. Der katadioptrische

20

25

30

Objektivteil 806 bildet das Licht des ersten Zwischenbildes auf ein zweites Zwischenbild 830 ab, das in der Nähe des ersten Faltungsspiegels 808 liegt. Genauer liegt das zweite Zwischenbild in der Nähe einer der optischen Achse 810 zugewandten inneren Spiegelkante 811
5 des ersten Faltungsspiegels 808 im geometrischen Raum zwischen dieser Kante und der letzten Linse 812 des ersten refraktiven Objektivteils 805. Vom zweiten Zwischenbild 830 läuft das Licht durch den zweiten katadioptrischen Objektivteil 809, der auf dem Rückweg vom Konkavspiegel 810 ein drittes Zwischenbild 840 erzeugt, das unmittelbar
10 vor dem zweiten Faltungsspiegel 812 liegt. Durch den zweiten refraktiven Objektivteil 815 wird das dritte Zwischenbild 840 direkt, d.h. ohne weiteres Zwischenbild, auf den in der Bildebene 803 angeordneten Wafer abgebildet.

15 In Fig. 9 ist besonders gut zu erkennen, dass der von der Objektebene 801 zum ersten Konkavspiegel 807 führende Strahlweg 860 und der vom ersten Konkavspiegel 807 zu den nachfolgenden Objektivteilen und schließlich zur Bildebene führende zweite Strahlungsweg 861 sich in der Nähe des ersten Faltungsspiegels 808 etwa im Bereich des ersten Zwischenbildes überkreuzen. Der weitere Strahlverlauf hinter dem zweiten
20 Zwischenbild ist dann kreuzungsfrei.

Dieser kreuzförmige Aufbau mit zwei coaxialen Konkavspiegeln hat genau drei reelle Zwischenbilder. Es existieren daher vier mögliche
25 Positionen für Strahlbündel begrenzende Aperturblenden (reelle Pupillenlagen), nämlich im ersten refraktiven Objektivteil 805, in der Nähe der Konkavspiegel 807 und 810, und im zweiten refraktiven Objektivteil 815. In diesem speziellen Ausführungsbeispiel befindet sich die Aperturblende 870 im ersten refraktiven Objektivteil.

30

Die Faltungsspiegel 808, 812 befinden sich jeweils in geometrischer (räumlicher) Nähe der Zwischenbilder, was den Lichtleitwert minimiert,

so dass das Objektfeld minimal außeraxial angeordnet werden kann. Die Zwischenbilder, d.h. der gesamte Bereich zwischen dem paraxialen Zwischenbild und dem Randstrahlzwischenbild, liegen jedoch nicht auf den Spiegelflächen, so dass eventuelle Fehler der Spiegelflächen nicht scharf in die Bildebene abgebildet werden. Dabei liegen das erste und das dritte Zwischenbild jeweils sowohl optisch als auch geometrisch in unmittelbarer Nähe des nächstliegenden Faltungsspiegels, während das zweite Zwischenbild 830 zwar geometrisch in unmittelbarer Nähe der inneren Spiegelkante 811 liegt, optisch jedoch etwa mittig zwischen den Konkavspiegeln ab 807 und 810.

Die Spiegelflächen der Faltungsspiegel sind bei dieser Ausführungsform jeweils um 45° gegenüber der optischen Achse geneigt, so dass die Faltungswinkel exakt 90° betragen. Diese rechtwinklige Faltung ist günstig für die Performance der Spiegelschichten der Faltungsspiegel.

Die Retikelebene 801 (Ebene des Objektfeldes) wird nicht durch die Fassungstechnik berührt. Insbesondere besteht zu den Konkavspiegeln aufgrund des ersten Relaissystems 805 ein großer Abstand. Es sind keine abgeschnittenen Linsen notwendig, so dass alle Linsen als Rundlinsen ausgeführt sein können.

In den Tabellen 5 und 6 ist die Spezifikation des Designs in tabellarischer Form und üblicher Notation zusammengefasst. Das als kadioptrisches Immersionsobjektiv ausgelegte System erreicht bei einem Vollfeld von $26 \times 5,5 \text{ mm}^2$ und Reinstwasser als Immersionsflüssigkeit eine bildseitige numerische Apertur $NA = 1,3$. Das Projektionsobjektiv an sich ist nicht aperturbegrenzt, da eine günstige Faltungsgeometrie mit Zwischenbild in der Nähe eines Faltungsspiegels vorliegt. Höhere Aperturen, z.B. $NA = 1,35$ oder $NA = 1,4$ oder $NA = 1,5$ oder $NA = 1,7$ sind bei Verwendung höherbrechender Immersionsmedien verfügbar. Das Diagonalverhältnis zwischen der Länge einer Diagonale eines zur

optischen Achse zentrierten, das Objektfeld einschließenden Minimalkreises und der Länge einer Diagonale des Objektfeldes (vgl. Fig. 3) beträgt ca. 1,17. Die Wellenfrontaberrationen liegen bei 7,5 mλ. Bei Ausführungsformen für 193nm bestehen alle Linsen aus Siliziumdioxid. Die optisch freien Linsendurchmesser liegen deutlich unterhalb 300mm. Die Masse des für die Linsenherstellung notwendigen Rohmaterials (Blankmasse) ist im Vergleich zu herkömmlichen refraktiven Systemen oder eingangs erwähnten herkömmlichen katadioptrischen Systemen mit h- oder 1-Faltung geringer, was eine deutliche Verbesserung darstellt.

Im Folgenden sind weitere Besonderheiten angegeben, die jeweils einzeln oder in Kombination mit anderen Merkmalen bei dieser und bei anderen Ausführungsformen günstig sein können. Das Design beinhaltet vier Feldlinsen bzw. Feldlinsensysteme 812, 885, 886/887, 888 mit positiver Brechkraft, die jeweils in unmittelbarer Nähe der Faltungsspiegel und der Zwischenbilder angeordnet sind. In mindestens einem der katadioptrischen Horizontalarme sollte eine Negativlinse vorhanden sein, um die chromatische Korrektur zu gewährleisten. Vorzugsweise ist in jedem katadioptrischen Objektivteil mindestens eine Negativlinse 890, 891, 892 vorgesehen, vorzugsweise in unmittelbarer Nähe zum Konkavspiegel. Günstige Varianten beinhalten mindestens drei doppelt durchtretene Linsen. Im gezeigten Ausführungsbeispiel sind es sechs doppelt durchtretene Linsen, nämlich die Feldlinsen 885, 886, 887 und die Negativlinsen 890, 891, 892 vor den Konkavspiegeln für die chromatische Korrektur des Farblängsfehlers.

Günstige Varianten beinhalten wenig negative Brechkraft in den refraktiven Objektivteilen, wodurch die Linsendurchmesser dieser Teile insgesamt gering gehalten werden können. Im Ausführungsbeispiel ist nur im zweiten refraktiven Objektivteil 815 eine bikonkave Negativlinse 880 im divergenten Strahlengang eingangs des Objektivteils vorge-

sehen, an deren Austrittsseite für die Korrektur günstige hohe Inzidenzwinkel auftreten.

Das Design weist in den Zwischenbildern starke Koma auf, insbesondere im dritten Zwischenbild 840. Dies hilft, die Sinusbedingung im Bildraum ohne Flächen mit übergroßen Inzidenzwinkeln im zweiten refraktiven Objektivteil 815 zu korrigieren.

Es sind zahlreiche Varianten möglich. Fig. 10 zeigt hierzu beispielhaft eine optisch identische Variante eines Projektionsobjektivs 800' mit gegenüber der optischen Achse schräg geneigten katadioptrischen Teilsystemen für günstigere Spiegelschichten. Bei der gezeigten Ausführungsform sind die Horizontalarme weiterhin coaxial, jedoch um 20° gegenüber einer senkrecht abstehenden Ausrichtung geneigt. Somit können die Inzidenzwinkel an den Faltungsspiegeln verringert werden.

Es ist auch möglich, erfindungsgemäße Projektionsobjektive als Trockenobjektiv auszulegen. Fig. 11 zeigt beispielhaft ein Projektionsobjektiv 900 mit einer bildseitigen numerischen Apertur $NA = 0,95$ und endlichem Arbeitsabstand am Wafer. Bei Trockensystemen ist im Betrieb der Raum zwischen der Objektivaustrittsfläche und dem Wafer mit einem Gas gefüllt. Systemdaten für das kreuzförmige Trockensystem in Fig. 11 sind in den Tabellen 7 und 8 angegeben. Bei diesem System treten an einzelnen Flächen des zweiten refraktiven Objektivteils, insbesondere an der Austrittsfläche der eingangsseitigen bikonkaven Negativlinse und an der Austrittsfläche der objektseitig konkaven Negativ-Meniskuslinse in unmittelbarer Nähe der bildnächsten Pupillenfläche sehr hohe Inzidenzwinkel auf, die wirksam zur Korrektur beitragen.

Die in den Figuren 9 bis 11 gezeigten Ausführungsformen sind so ausgelegt, dass die beiden ebenen Faltungsspiegel in geringem Abstand voneinander, Rücken an Rücken, d.h. mit einander abgewandten

Spiegelflächen, positioniert sind. Dies kann unter Umständen durch einen einzigen, doppelt verspiegelten Körper geschehen, der die Form einer planparallelen Platte haben kann. Prinzipiell ist es auch möglich, dass die Strahlumlenkung mit einem Vollmaterialprisma geschieht, wie es in Fig. 12 gezeigt ist. Hierbei tritt das von der Objektebene kommende Licht zunächst in das Faltungsprisma 895 ein und die erste Faltungsreflexion erfolgt an der Hypotenusenfläche 896 des Prismas. Nach Durchlaufen des ersten katadioptrischen Objektivteils und des zweiten katadioptrischen Objektivteils erfolgt die zweite Faltungsreflexion an derselben Hypotenusenfläche, jedoch auf deren Rückseite. Bei der in Fig. 12 gezeigten Ausführungsform führt ein erster Strahlweg von der (nicht gezeigten) Objektebene über den ersten Faltungsspiegel (Innenseite der Hypotenusenfläche) und den (nicht gezeigten, in der Figur unten angeordneten) ersten Konkavspiegel zum zweiten (nicht gezeigten, in der Figur oben liegenden) zweiten Konkavspiegel, und der zweite Strahlabschnitt führt nach Reflexion am zweiten Konkavspiegel über den zweiten Faltungsspiegel (Außenseite der Hypotenusenfläche) in Richtung Bildebene. Dabei findet die Überkreuzung der Strahlwege unmittelbar nach der Reflexion am zweiten Faltungsspiegel und der Bildung des dritten Zwischenbildes in unmittelbarer Nähe der Spiegelfläche des zweiten Faltungsspiegels zwischen dieser und der ersten Linse des nachfolgenden, zweiten refraktiven Objektivteils statt.

Für den Fall, dass für das Umlenkprisma aus Gründen der Laserbeständigkeit Kalziumfluorid gewählt wird, ist zu beachten, dass dessen Brechungsindex von $n \approx 1,50$ bei 193nm und der am Zwischenbild vorliegenden numerischen Apertur von ca. $NA = 0,3$ nicht mit einer Totalreflexion über den gesamten Strahlquerschnitt gerechnet werden kann. Daher ist es günstig, auf die Hypotenusenfläche eine leistungsfähige, beidseitig reflektierende Reflexschicht aufzubringen. Es ist aber auch möglich, den Faltungswinkel im Prisma derart zu vergrößern, dass an der Hypotenusenfläche für alle auftreffenden Strahlen

Totalreflexion auftritt. Dann kann auf eine Reflexbeschichtung verzichtet werden.

Im Rahmen dieser kreuzförmigen Designs sind zahlreiche Varianten möglich. Beispielsweise ist es möglich, unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe vorzusehen, z.B. Reduktionsmaßstäbe von 4:1, 5:1 oder 6:1. Größere Abbildungsmaßstäbe (z.B. 5:1 oder 6:1) können günstiger sein, da sie die objektseitige Apertur verringern und somit die Faltungsgeometrie entspannen können.

10

Das als Relaissystem dienende, erste refraktive Teilsystem, welches das erste Zwischenbild erzeugt, hat bei den Ausführungsbeispielen einen Abbildungsmaßstab β nahe 1. Dies ist jedoch nicht zwingend. Ebenso wenig müssen die katadioptrischen Objektiveile Abbildungsmaßstäbe in der Nähe von 1 haben. Hier kann ein vergrößernder Abbildungsmaßstab des ersten Objektiveils zur Entspannung der Faltungsgeometrie günstig sein.

Bei den obigen Beispielen katadioptrischer Systeme mit drei Zwischenbildern und zwei katadioptrischen Teilsystemen ist das refraktive Frontsystem (erstes Teilsystem, Relaisystem) unsymmetrisch aufgebaut. Der Abstand zwischen den zwei planen Faltungsspiegeln sollte klein sein, damit die Entfernung des ausseraxialen Objektfeldes von der optischen Achse bei vignettierungsfreier Abbildung möglichst klein bleibt und somit die Anforderungen an das optische Design zur Erzielung einer kleinen Etendue bzw. eines kleinen Überfeldes sinken. Ausserdem bleibt dann der Objekt-Image-Shift (OIS), d.h. der laterale Versatz zwischen objektseitiger optischer Achse und bildseitiger optischer Achse, klein.

Anhand von Fig. 13 wird eine Variante eines kreuzförmigen katadioptrischen Systems 1000 mit zwei Konkavspiegeln und drei Zwischenbildern gezeigt, das sich durch einen weitgehend symmetrischen Aufbau

auszeichnet. Es hat zwischen seiner Objektebene 1001 und seiner Bildebene 1002 einen ersten refraktiven Objektivteil 1010, der ein erstes Zwischenbild 1011 erzeugt, einen ersten katadioptrischen Objektivteil 1020, der aus dem ersten Zwischenbild ein zweites Zwischenbild 1021 erzeugt, einen weiteren katadioptrischen Objektivteil 1030, der aus dem zweiten Zwischenbild ein drittes Zwischenbild 1031 erzeugt und einen vierten, refraktiven Objektivteil 1040, der das dritte Zwischenbild in die Bildebene 1002 abbildet. Alle Objektivteile haben positive Brechkraft. Linsen oder Linsengruppen mit positiver Brechkraft werden durch Doppelpfeile mit nach außen gerichteten Spitzen, Linsen oder Linsengruppen mit negativer Brechkraft dagegen durch Doppelpfeile mit nach innen gerichteten Spitzen repräsentiert.

Ein erster Strahlabschnitt 1050 verläuft von der Objektebene 1001 über den ersten Faltungsspiegel 1055 und den zugeordneten im Lichtweg folgenden Konkavspiegel 1025 zum Konkavspiegel 1035 des zweiten katadioptrischen Objektivteils 1030. Ein zweiter Strahlabschnitt 1060 verläuft von diesem Konkavspiegel 1035 über den zweiten Faltungsspiegel 1065 zur Bildebene. Auf dem Weg vom zweiten Faltungsspiegel zur Bildebene kreuzt der zweite Strahlabschnitt den ersten Strahlabschnitt im Bereich vor der Spiegelfläche des zweiten Faltungsspiegels.

Der erste Objektivteil 1010 besteht aus einer ersten Linsengruppe LG1 mit positiver Brechkraft und einer zweiten Linsengruppe LG2 mit positiver Brechkraft. Zwischen diesen zwei Linsengruppen schneidet der Hauptstrahl die optische Achse an der Stelle einer bevorzugten Blendenebene (Systemblende) 1070.

Vorzugsweise besteht die erste Linsengruppe LG1 aus mindestens zwei Positivlinsen, nämlich mindestens einer feldnahen Linse L1 und mindestens einer aperturnahen Linse L2. Entsprechendes gilt für die

Linsengruppe LG2, die vorzugsweise mindestens eine feldnahe Linse L4 und mindestens eine aperturnahe Linse L3 hat.

- Die Erfüllung folgender Bedingungen kann einzeln oder in Kombination
5 günstig sein, um die Fertigung des Systems zu vereinfachen:
LG1 = LG2; L1 = L2 = L3 = L4; L1 = L4; L2 = L3.

In diesen Gleichungen ist die Gleichheit zweier Linsen als Gleichheit von
deren Radien zu verstehen. Die Linsen können also ungleiche Dicken
10 haben. Die Gleichheit von Radien ist nicht mathematisch exakt zu
verstehen, sondern in fertigungstechnischer Hinsicht derart, dass die
Linsenflächen mit dem gleichen Werkzeug herstellbar sein sollen. Für
die Gleichheit von Linsengruppen gelten entsprechende Randbedin-
gungen. Solche Systeme bieten Vorteile bei der Fertigung, da Herstel-
15 lung und Prüfung der Linsen vereinfacht werden.

Die Anordnung der Linsen kann symmetrisch oder unsymmetrisch zu
einer zur optischen Achse senkrechten Ebenen sein. Günstig ist hier ein
symmetrischer Aufbau in Bezug auf die Blendenebene 1070. Bei
20 vorteilhaften Ausführungsformen ist in dieser Blendenebene die Apertur-
blende zur variablen Begrenzung des Strahlbündeldurchmessers
angebracht. Dies ist günstig, weil dadurch keine asymmetrischen
Bildfehler in das erste Zwischenbild 1011 eingeführt werden.

- 25 Der Abbildungsmaßstab β des ersten Objektivteils 1010 kann ca. $\beta = 1$
betragen. Vorzugsweise ist das erste Teilsystem 1010 zwar weitgehend
symmetrisch aufgebaut, wird aber unsymmetrisch betrieben, d.h. mit
 $\beta \neq 1$. Vorteil dieser quasi symmetrischen Anordnung ist die Einführung
eines für die weitere Korrektur vorteilhaften Wertes der chromatischen
30 Vergrößerungsdifferenz (Farbquerfehler) und anderer asymmetrischer
Bildfehler, hauptsächlich Koma.

Das Objektiv kann eine oder mehrere asphärische Flächen haben. Vorzugsweise trägt die feldnahe angeordnete Linse L1 mindestens eine asphärische Fläche, um die Telezentrie im Objektraum zu korrigieren. Alternativ oder zusätzlich kann eine der Linsen L3 und/oder L4
5 mindestens eine asphärische Fläche tragen, um die sphärische Aberration im ersten Zwischenbild zu korrigieren. Das entspannt die Faltungsgeometrie und erlaubt eine kleine Etendue (Lichtleitwert).

Vorzugsweise wird der erste Objektivteil 1010 „petzvalarm“ aufgebaut,
10 also mit Linsen mit reduzierter Petzvalsumme. Ein „petzvalarmer“ Aufbau kann erzeugt werden, wenn Linsen mit kleiner Petzvalsumme eingesetzt werden, insbesondere geeignete Menisken. Die Telezentrie, sphärische Aberration und Astigmatismus können durch Asphären auf den Linsen L1 und L2 oder L3 und L4 korrigiert werden.

15 Allgemein sollte bei dieser wie bei den anderen Ausführungsformen der optische Abstand zwischen einer Spiegelfläche eines Faltungsspiegels und dem nächstliegenden Zwischenbild zwischen einem endlichen Mindestabstand und einem Maximalabstand liegen. Der Maximal-
20 abstand kann z.B. ein 1/10 oder 1/15 oder 1/20 der Systemlänge (Baulänge, Abstand zwischen Objektebene und Bildebene) betragen. Der Mindestabstand sollte dem gegenüber klein sein.

Es ist günstig, wenn der erste Objektivteil 1010 sphärisch überkorrigiert
25 ist, falls der erste Faltungsspiegel 1055 sich hinter dem paraxialen Zwischenbild 1011 befindet und sphärisch unterkorrigiert, wenn das paraxiale Zwischenbild sich hinter dem Faltungsspiegel befindet. Dadurch ist sichergestellt, dass das Zwischenbild nicht auf der Spiegelfläche liegt.

30 Vorzugsweise wird die Petzvalsumme so eingestellt, dass der Fokus des äußersten Feldpunktes und des innersten Feldpunktes sich nahezu im

gleichen Abstand zum ersten Faltungsspiegel befinden. Dann kann das Zwischenbild nahe an die Spiegelfläche herangerückt werden, da sich das gekrümmte Bildfeld von der Spiegelfläche wegwölbt. Das entspannt die Faltungsgeometrie und erlaubt eine kleine Etendue.

5

Die katadioptrischen Objektivteile 1020, 1030 sind vorzugsweise doppelt telezentrisch aufgebaut. Das erlaubt die Korrektur des Astigmatismus im zweiten und dritten Zwischenbild.

- 10 Es ist möglich, dass der erste Objektivteil 1010 keine Negativlinsen hat. Bei manchen Ausführungsformen ist vorgesehen, auch im refraktiven ersten Objektivteil 1010 die Petzvalsumme zu korrigieren oder stark zu reduzieren. Dafür können objektnahe bzw. bildnahe Negativlinsen genutzt werden.

15

- Die katadioptrischen Objektivteile 1020, 1030 sind vorzugsweise axial-symmetrisch aufgebaut, so dass alle Linsen im doppelten Durchtritt genutzt werden. Es ist günstig, wenn sie aus einer positiven Linsengruppe LG4 bzw. LG5 in der Nähe des entsprechenden Zwischenbildes
20 und einer negativen Linsengruppe LG3 bzw. LG6 in der Nähe des Konkavspiegels stehen. Die positiven Linsengruppen LG4, LG5 haben vorzugsweise ein oder zwei Positivlinsen, die negativen Linsengruppen LG6, LG3 haben maximal drei Negativlinsen. Bei manchen Ausführungsformen kann in einem der katadioptrischen Objektivteile auf
25 Negativlinsen verzichtet werden.

- Ein symmetrischer Aufbau der katadioptrischen Teile kann günstig sein. Vorzugsweise werden gemäß den obigen Erläuterungen folgende Bedingungen alternativ oder in Kombination erfüllt: $LG4 = LG5$;
30 $LG3 = LG6$; und $M1 = M2$, wobei M1 und M2 die Konkavspiegel 1020, 1035 sind. Die Gleichheit der optischen Komponenten ist im Sinne obiger Definition von Radiengleichheit zu verstehen. Bei symmetrischem

Aufbau wird die Aberrationslast (Petzval- und Farblängsfehler CHL) auf beide katadioptrischen Objektivteil im Wesentlichen gleichmäßig verteilt. Dieser Aufbau kann sehr vorteilhaft sein, da die Brechkräfte und dadurch die Aberrationsbeiträge minimiert werden können.

5

Es kann günstig sein, die katadioptrischen Objektivteile 1020, 1030 quasisymmetrisch, d.h. mit einem leicht von $\beta = 1$ abweichenden Abbildungsmaßstab zu betreiben. Das erlaubt eine einfache Korrektur des Farbquerfehlers (CHV) für das gesamte System.

10

In einer anderen bevorzugten Anordnung bestehen die positiven Linsengruppen LG4, LG5 jeweils aus zwei Positivlinsen, die insbesondere gleich sein können. Das entspannt die Aberrationsbeiträge dieser Linsengruppen.

15

Es kann günstig sein, wenn die katadioptrischen Objektivteile 1020, 1030 so aufgebaut sind, dass sich die Petzvalsumme der refraktiven Linsenelemente der Linsengruppen LG3 und LG4 im ersten katadioptrischen Objektivteil 1020 und LG5 und LG6 im zweiten katadioptrischen Objektivteil 1030 gegenseitig weitgehend oder vollständig kompensieren. Dann bleibt hauptsächlich der Petzvalbeitrag der Konkavspiegel 1025, 1035 für die Kompensation der Petzvalkrümmung der Objektivteile.

25 In den katadioptrischen Teilen können eine oder mehrere asphärische Flächen vorgesehen sein. Das erlaubt oder unterstützt eine Korrektur im zweiten und dritten Zwischenbild und somit eine Entspannung der Faltung sowie eine Reduzierung des Lichtleitwertes.

30 Der refraktive Objektivteil 1040 ist vorzugsweise aus drei Linsengruppen aufgebaut, nämlich einer ersten feldnahen Linsengruppe LG7 sowie einer zweiten und dritten Linsengruppe LG8 und LG9, zwischen denen

der Hauptstrahl die optische Achse schneidet, so dass hier eine bevorzugte Blendenebene entsteht. Linsengruppe LG8 vor der Systemblende hat vorzugsweise mindestens eine zur Bildebene gekrümmte Fläche mit hohen Strahlwinkeln, beispielsweise eine bildseitige Linsenfläche einer negativen Meniskuslinse oder einer negativen bikonkaven Linse. Diese trägt wesentlich zur Korrektur der Sinusbedingung bei. Zwischen der Blendenposition und der Bildebene, d.h. in Linsengruppe LG9 sollte keine Linsengruppe angeordnet sein. Günstig ist es, wenn die letzten zwei oder mehr Linsenelemente aus Kalziumfluorid mit verschiedenen Kristallorientierungen bestehen, wodurch Compaction-Probleme vermieden und gleichzeitig Einflüsse der intrinsischen Doppelbrechung mindestens teilweise kompensiert werden können.

Die beiden planparallelen Faltungsspiegel 1055, 1065 können an einer einzigen, auf beiden Seiten reflektierenden Planparallelplatte vorgesehen sein. Diese sollte aus einem hochtransparenten Material bestehen. Das erlaubt eine einfache Prüfung der Parallelität vor der Belegung mit reflektierenden Schichten. Bevorzugtes Material für den Träger ist Siliziumdioxid. Durch einen geringen Abstand zwischen den Faltungsspiegeln ist eine Reduzierung der Objektivetendue (und des Object Image Shift) möglich.

Im Rahmen der Erfindung sind auch Systeme mit mehr als drei Zwischenbildern möglich. Dadurch können weitere Design-Freiheitsgrade zur Optimierung des Bauraumbedarfs und der optischen Korrektur geschaffen werden. Das Projektionsobjektiv 1100 in Fig. 14 hat zwischen seiner Objektebene 1101 und der Bildebene 1102 ein erstes refraktives Teilsystem 1110 zur Erzeugung eines ersten reellen Zwischenbildes 1111, einen ersten katadioptrischen Objektivteil 1120 zur Erzeugung eines zweiten reellen Zwischenbildes 1121 aus dem ersten Zwischenbild, ein zweites refraktives Teilsystem 1130 zur Erzeugung eines dritten Zwischenbildes 1131 aus dem zweiten

Zwischenbild, einen weiteren katadioptrischen Objektivteil 1140 zur Erzeugung eines vierten Zwischenbildes 1141 aus dem dritten Zwischenbild und einen dritten refraktiven Objektivteil 1150, der das vierte Zwischenbild in die Bildebene 1102 abbildet. Der erste
5 katadioptrische Objektivteil 1120 umfasst einen ersten Faltungsspiegel 1122 zur Umlenkung der vom Objekt kommenden Strahlung Richtung des Konkavspiegels 1125 und der zweite katadioptrische Objektivteil 1140 hat einen dem Konkavspiegel 1145 zugeordneten Faltungsspiegel 1142, der die vom Konkavspiegel 1145 kommende Strahlung Richtung
10 Bildebene umlenkt.

Im Bereich des ersten katadioptrischen Objektivteils führt ein erster Strahlabschnitt 1160 von der Objektebene über den ersten Faltungsspiegel 1122 zum Konkavspiegel 1125 und ein zweiter
15 Strahlabschnitt 1170 von diesem zu den nachfolgenden Objektivteilen. Die beiden Strahlabschnitte überkreuzen sich in der Nähe der dem ersten Objektivteil 1110 zugewandten objektseitigen Spiegelkante des Faltungsspiegels 1122. Eine symmetrische Situation ergibt sich im zweiten katadioptrischen Objektivteil 1140. Die von der Objektebene zu
20 dessen Konkavspiegel 1145 verlaufende Strahlung bildet einen ersten Strahlabschnitt 1170, die vom Spiegel 1145 reflektierte und vom Planspiegel 1142 Richtung Bildebene umgelenkte Strahlung einen zweiten Strahlabschnitt 1180, der den ersten Strahlabschnitt in einem Kreuzungsbereich zwischen Faltungsspiegel 1142 und refraktivem
25 Teilsystem 1150 überkreuzt. Das gesamte Projektionsobjektiv kann im Wesentlichen einen punktsymmetrischen Aufbau haben, bei dem der Symmetriepunkt innerhalb des mittleren Relaisystems 1130 liegt.

Die eintrittsseitigen und austrittsseitigen refraktiven Systeme 1110 bzw.
30 1150 haben jeweils einen Abbildungsmaßstab $\beta \approx 1$, dies gilt auch für die katadioptrischen Objektivteile 1120 und 1140. Das refraktive Relaisystem 1130, welches die Strahlung vom ersten katadioptrischen

Teilsystem 1120 zum zweiten katadioptrischen Teilsystem 1140 mit einer Abbildung überführt, hat einen Abbildungsmaßstab im Bereich von 1:3 bis 1:6. Diese Verkleinerung entspricht auch der gesamten Verkleinerung des Projektionsobjektivs. Im Grundaufbau refraktiv – katadioptrisch – refraktiv – katadioptrisch – refraktiv kann die Achsorientierung nach Bedarf durch geeignete Ausrichtung der Faltungsspiegel eingestellt werden.

Die Aberrationskompensation verläuft ähnlich wie bei den vorherigen Beispielen. Der durchgezogene Linienzug entspricht dem Hauptstrahl des äußeren Feldpunktes.

Bei dem System in Fig. 14 verlaufen die optischen Achsen der katadioptrischen Teilsysteme 1120 und 1140 coaxial, so dass eine Neigung einer der Achsen die Neigung der anderen Achsen festlegt. Wenn beispielsweise eine Achse geneigt wird, um Bauraum zu schaffen, kann sich die andere Achse so neigen, dass Bauraum eingeschränkt wird. Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele gezeigt, die solche Probleme vermeiden können. Sie können als selbständige Projektionsobjektive oder als Teilsysteme innerhalb eines komplexeren katadioptrischen Aufbaus genutzt werden.

Das Projektionsobjektiv 1200 in Fig. 15 stellt vom Grundaufbau her eine Kombination eines katadioptrischen Projektionsobjektivs 1210 mit 1-Faltung und zwei an einem Spiegelprisma angebrachten Faltungsspiegeln (vgl. Fig. 5) und eines nachfolgenden katadioptrischen Teilsystems 1220 mit modifizierter 1-Faltung und gekreuztem Strahlengang (beispielsweise gemäß Fig. 4) dar. Das erste katadioptrische Teilsystem 1210 erzeugt aus dem außeraxialen Feld, welches in seiner Objekzebene 1201 angeordnet ist, ein reelles Zwischenbild 1202. Dieses wird durch das zweite katadioptrische Teilsystem 1220 in die Bildebene 1203 des Systems abgebildet.

Die Objektebene 1201 des gezeigten Systems kann die Objektebene des gesamten Projektionsobjektivs oder eine Zwischenbildebene sein, in der ein Zwischenbild liegt, das von einem vorgeschalteten, in Fig. 15
5 nicht gezeigten Teilsystem erzeugt wird. Fig. 16 zeigt beispielhaft einen solchen Aufbau, bei dem ein refraktives Teilsystem 1250 vorgesehen ist, das als Relaissystem dient und ein reelles Zwischenbild der Objektebene 1290 in der Ebene 1201 erzeugt. Dieses dient als Objekt des nachfolgenden katadioptrischen Systems gemäß Fig. 15, welches zwei
10 axial versetzte Konkavspiegel umfasst.

Bei beiden Ausführungsformen führt ein erster Strahlabschnitt über mehrfache Faltung zum Konkavspiegel 1221 des zweiten katadioptrischen Objektivteils 1220, während ein zweiter Strahlabschnitt von
15 diesem Spiegel über den zweiten Faltungsspiegel 1242 zur Bildebene 1203 verläuft. Im geometrischen Raum zwischen dem austrittsseitigen Faltungsspiegel 1212 des ersten katadioptrischen Objektivteils und dem ersten Faltungsspiegel 1222 des zweiten katadioptrischen Objektivteils 1220 überkreuzen sich hinter dem Zwischenbild 1202 der erste
20 Strahlweg und der zweite Strahlweg.

Das in Fig. 15 gezeigte Abbildungssystem, das ein selbständiges Projektionsobjektiv oder ein Teilsystem innerhalb eines größeren Projektionsobjektivs (vgl. Fig. 16) sein kann, hat zwei reelle
25 Zwischenbilder 1202, 1232. Die optischen Achsen der katadioptrischen Objektivteile 1210, 1220 sind voneinander entkoppelt, also nicht coaxial zueinander, sondern lateral parallel zueinander versetzt. Die katadioptrischen Teilsysteme sind jeweils axialsymmetrisch aufgebaut. Jedes beinhaltet eine objektnahe positive Linsengruppe und eine dem
30 Konkavspiegel nahe negative Linsengruppe. Damit ist auch hier positive Brechkraft in der Nähe der Zwischenbilder und der Faltungsspiegel

angeordnet, während in der Nähe der Konkavspiegel negative Brechkraft konzentriert ist.

Wie in Fig. 16 gezeigt, kann das in Fig. 15 dargestellte Teilsystem dazu
5 genutzt werden, das von einem Relaissystem 1250 erzeugte Zwischen-
bild des Objektfeldes in die Bildebene des Projektionsobjektivs abzu-
bilden. Das Gesamtsystem hat dann drei Zwischenbilder.

Eine andere Variante sieht vor, dass bei diesem System die optischen
10 Achsen der Spiegelgruppen beide in Richtung Waferebene geneigt
werden können. Das erhöht den Bauraum zwischen dem Konkavspiegel
des ersten katadioptrischen Objektivteils und der Retikelebene bzw.
Zwischenbildebene 1201.

15 Alle beispielhaft dargestellten Ausführungsformen können anstelle des
Projektionsobjektivs 5 in die in Fig. 1 gezeigte Projektionsbelichtungs-
anlage eingebaut werden. Bei Waferscannern ist zu beachten, dass die
Ansteuerung für die Bewegungen der Einrichtung 40 zum Halten und
Manipulieren einer Maske (Retikel-Stage) und der Einrichtung 50 zum
20 Halten und Manipulieren des Wafers (Wafer-Stage) an den Typ des
katadioptrischen Projektionsobjektivs anzupassen ist. Je nach Anzahl
der Faltungsspiegel, der Konkavspiegel und der Zwischenbilder ist die
Ansteuerung so zu konfigurieren, dass entweder eine gleich gerichtete
Scanbewegung von Retikel- und Wafer-Stage oder eine gegenläufige
25 Bewegung von Retikel- und Wafer-Stage während des Scannens erfolgt.
Ergibt die Summe S aus der Anzahl Z der Zwischenbilder, der Anzahl F
der Faltungsspiegel und der Anzahl K der Konkavspiegel eine ungerade
Zahl, so ist eine gleichläufige Scanbewegung vorzugehen, ist die
Summe S eine gerade Zahl, so ist eine gegenläufige Scanbewegung zu
30 erzeugen. Daher ist bei den anhand Figuren 9, 10, 11, 12, 13 und 16
erläuterten Ausführungsformen eine gleichgerichtete Scanbewegung
vorzusehen, während bei den Ausführungsformen gemäß Figuren 2, 6,

7, 8, 14 und 15 Retikel und Wafer gegenläufig zueinander entlang der y-Achse zu bewegen sind.

5

- - - - -

Tabell 1

Fläche	Radien	Dicken	Material	Index	½ Durchm.
1	0,000000	0,000000	AIR		79,675
2	0,000000	10,000000	SIO2HL	1,56018811	79,675
3	0,000000	1,000000	AIR		81,476
4	319,475286	20,000234	SIO2HL	1,56018811	85,084
5	995,269474	68,424969	AIR		85,919
6	0,000000	169,872505	AIR		95,577
7	-970,753457	44,999585	SIO2HL	1,56018811	119,609
8	-327,540786	217,911147	AIR		123,649
9	-231,387741	17,500000	SIO2HL	1,56018811	125,416
10	-1065,062890	48,294619	AIR		135,575
11	-196,821494	17,500000	SIO2HL	1,56018811	136,404
12	-525,772724	32,979078	AIR		160,520
13	0,000000	0,000000	REFL		204,292
14	264,796887	32,979078	REFL		162,687
15	525,772724	17,500000	SIO2HL	1,56018811	160,034
16	196,821494	48,294619	AIR		132,915
17	1065,062890	17,500000	SIO2HL	1,56018811	130,452
18	231,387741	217,911147	AIR		117,791
19	327,540786	44,999585	SIO2HL	1,56018811	101,599
20	970,753457	181,477269	AIR		96,159
21	0,000000	128,395393	AIR		61,789
22	0,000000	24,998738	AIR		110,784
23	312,774233	50,000130	SIO2HL	1,56018811	135,026
24	-938,039680	2,332118	AIR		135,592
25	715,324368	28,435222	SIO2HL	1,56018811	135,878
26	-1554,047709	0,949762	AIR		135,289
27	626,921957	28,002516	SIO2HL	1,56018811	132,433
28	-1428,035483	37,991193	AIR		130,956
29	-309,156200	9,521188	SIO2HL	1,56018811	125,631
30	-562,362375	181,567266	AIR		125,277
31	-173,995248	9,499422	SIO2HL	1,56018811	99,321
32	247,888809	29,437283	AIR		109,165
33	8340,117725	32,129675	SIO2HL	1,56018811	111,460
34	-312,940978	7,464540	AIR		116,082
35	929,377252	44,625129	SIO2HL	1,56018811	132,361
36	-333,512913	0,949477	AIR		134,568
37	591,097249	44.418308+C2	SIO2HL	1,56018811	140,004
38	-1614,017804	24,278142	AIR		140,003
39	0,000000	-23,329538	AIR		138,515
40	302,573027	9,498538	SIO2HL	1,56018811	139,988
41	225,452829	23,324104	AIR		137,709
42	374,450165	43,305784	SIO2HL	1,56018811	138,658
43	-1347,892608	0,947859	AIR		139,026
44	302,595256	44,140336	SIO2HL	1,56018811	139,127
45	-12394,382724	0,947473	AIR		137,426
46	220,761542	40,029388	SIO2HL	1,56018811	125,456
47	809,070272	0,946947	AIR		121,419
48	163,063737	40,300977	SIO2HL	1,56018811	103,421
49	762,111474	0,946425	AIR		96,933
50	139,902742	77,435206	SIO2HL	1,56018811	75,207
51	0,000000	2,000000	H2OV193	1,43667693	19,413
52	0,000000	0,000000	AIR		17,000

Tabelle 2

	5	8 = 19	10 = 17	12 = 14	27
K	0	0	0	0	0
C1	-1,188191E-08	3,591288E-09	-4,791180E-09	-8,429951E-10	-5,683539E-09
C2	1,967391E-13	-3,350971E-14	6,912483E-14	-5,232984E-15	6,541643E-15
C3	-7,746732E-18	1,502596E-18	2,275816E-19	-3,132061E-19	-2,750649E-19
C4	4,382264E-23	2,954168E-23	1,312434E-22	-2,344674E-23	5,788139E-23
C5	4,532193E-26	-6,493001E-28	-4,748900E-27	6,334947E-28	-2,220373E-27
C6	-3,233502E-30	3,320789E-32	1,399914E-31	-1,231728E-32	8,916186E-32

5

	33	35	37	47	
K	0	0	0	0	
C1	-8,560622E-09	-2,328354E-08	1,335791E-09	-1,418195E-08	
C2	-1,349963E-12	2,144034E-12	-8,056724E-13	1,409773E-12	
C3	1,587936E-16	-1,398657E-16	4,148247E-17	-6,196993E-17	
C4	-8,008240E-21	5,252748E-21	-9,137514E-22	1,830118E-21	
C5	2,874374E-25	-1,188241E-25	1,616592E-26	-3,946542E-26	
C6	-6,218920E-30	1,696094E-30	-2,274089E-31	2,728014E-31	

Tabell 3

Fläch	Radien	Dicken	Material	Index	½ Durchm.
1	0,000000	0,000000	AIR		74,869
2	0,000000	10,000000	SIO2	1,56097018	74,869
3	0,000000	0,500000	AIR		76,658
4	3088,172820	10,000000	SIO2	1,56097018	76,952
5	0,000000	60,000000	AIR		78,641
6	0,000000	0,000000	AIR		95,735
7	0,000000	134,465366	AIR		95,735
8	302,601867	34,401664	SIO2	1,56097018	144,675
9	705,234819	68,979243	AIR		144,202
10	251,382127	33,175965	SIO2	1,56097018	149,996
11	426,058169	289,332591	AIR		147,417
12	-260,112697	20,000000	SIO2	1,56097018	121,372
13	-572,625245	42,216988	AIR		125,407
14	-171,019518	20,000000	SIO2	1,56097018	125,493
15	-855,924382	37,063295	AIR		149,787
16	0,000000	0,000000	REFL		192,254
17	264,447259	37,063295	REFL		151,718
18	855,924382	20,000000	SIO2	1,56097018	150,217
19	171,019518	42,216988	AIR		124,976
20	572,625245	20,000000	SIO2	1,56097018	124,607
21	260,112697	289,332591	AIR		118,964
22	-426,058169	33,175965	SIO2	1,56097018	123,141
23	-251,382127	68,979243	AIR		125,542
24	-705,234819	34,401664	SIO2	1,56097018	114,138
25	-302,601867	148,236577	AIR		113,753
26	0,000000	76,228794	AIR		65,370
27	0,000000	0,000000	AIR		87,565
28	0,000000	201,841415	AIR		87,565
29	1761,166817	50,475596	SIO2	1,56097018	148,012
30	-358,244969	284,608494	AIR		149,872
31	303,934833	35,000000	SIO2	1,56097018	147,098
32	509,533530	7,170752	AIR		143,625
33	370,904878	20,000366	SIO2	1,56097018	142,151
34	211,313761	62,331548	AIR		133,109
35	290,910582	56,153178	SIO2	1,56097018	138,951
36	-1106,757797	68,197851	AIR		137,608
37	-178,117460	59,999881	SIO2	1,56097018	133,318
38	-214,351289	-12,849220	AIR		148,117
39	0,000000	24,486144	AIR		141,938
40	277,046273	63,368104	SIO2	1,56097018	144,287
41	-757,891281	0,999992	AIR		142,301
42	127,447162	72,144248	SIO2	1,56097018	110,531
43	316,261462	0,099994	AIR		92,548
44	137,334842	47,277234	SIO2	1,56097018	81,195
45	210,414165	0,999989	AIR		54,341
46	110,455126	44,071322	SIO2	1,56097018	48,586
47	0,000000	0,000000	SIO2	1,56097018	16,000
48	0,000000	0,000000	AIR		16,000

Tabelle 4

Fläche	4	8 = 25	11 = 22	13 = 20	29	31
K	0	0	0	0	0	0
C1	-1,17E-08	7,10E-10	4,43E-09	-7,25E-09	2,55E-10	9,67E-09
C2	-5,58E-14	1,16E-14	-4,74E-14	2,48E-14	-6,17E-14	-7,64E-13
C3	-6,44E-18	8,33E-19	1,40E-18	1,28E-20	-6,21E-20	1,96E-17
C4	-4,47E-23	-4,54E-23	-5,27E-24	-1,12E-22	2,57E-23	-7,03E-22
C5	-7,31E-27	1,09E-27	-6,31E-28	8,33E-27	-4,83E-28	1,82E-26
C6	3,72E-32	-1,31E-33	2,42E-32	-1,64E-31	-1,36E-33	1,31E-31

5

Fläche	33	35	40	43	45	
K	0	0	0	0	0	
C1	-3,12E-08	9,65E-09	-7,80E-09	3,26E-08	8,42E-08	
C2	1,51E-12	-6,13E-13	1,23E-13	-5,62E-13	1,69E-11	
C3	-2,25E-17	8,81E-18	-3,25E-19	4,68E-17	-1,72E-16	
C4	-8,50E-23	3,92E-23	-6,27E-25	-1,11E-20	5,74E-19	
C5	1,19E-26	-5,57E-27	-3,07E-27	6,32E-25	-7,64E-23	
C6	-6,28E-31	8,11E-32	5,63E-32	-8,86E-30	1,33E-26	

Tabelle 5

Fäche	Radius	Dicke	Mat rial	Index	½ Durchm.
0	0.000000	40.000000			63.000
1	0.000000	0.000000			74.812
2	280.911554	29.101593	SIO2	1.56029525	78.206
3	1315.382634	67.564457			79.868
4	1226.076021	36.889857	SIO2	1.56029525	94.337
5	-224.620142	132.650952			95.649
6	132.557450	37.873616	SIO2	1.56029525	81.937
7	-1652.923938	26.883045			78.866
8	0.000000	138.896699			67.638
9	175.542348	36.333740	SIO2	1.56029525	75.651
10	-236.570865	100.002684			75.039
11	0.000000	9.995756			59.032
12	0.000000	-81.094895	REFL		110.211
13	-208.565918	-48.990866	SIO2	-1.56029525	104.471
14	517.535257	-178.645431			104.642
15	398.156640	-15.000000	SIO2	-1.56029525	100.231
16	-950.114340	-73.251055			103.344
17	116.287221	-15.000000	SIO2	-1.56029525	104.039
18	473.502609	-41.360609			140.152
19	194.854755	41.360609	REFL		143.288
20	473.502609	15.000000	SIO2	1.56029525	139.289
21	116.287221	73.251055			99.401
22	-950.114340	15.000000	SIO2	1.56029525	92.823
23	398.156640	178.645431			87.639
24	517.535257	48.990866	SIO2	1.56029525	84.803
25	-208.565918	81.097016			83.851
26	0.000000	84.970261			59.404
27	176.145326	23.179878	SIO2	1.56029525	79.591
28	756.736803	0.944155			79.800
29	314.641675	30.039119	SIO2	1.56029525	80.579
30	-500.071834	218.126390			80.744
31	-108.651460	15.000000	SIO2	1.56029525	80.556
32	-785.250977	30.057005			106.274
33	-182.598151	-30.057005	REFL		109.565
34	-785.250977	-15.000000	SIO2	-1.56029525	107.546
35	-108.651460	-218.126390			87.013
36	-500.071834	-30.039119	SIO2	-1.56029525	88.079
37	314.641675	-0.944155			87.604
38	756.736803	-23.179878	SIO2	-1.56029525	86.420
39	176.145326	-49.965147			85.965
40	0.000000	-10.012234			62.226
41	0.000000	69.993842	REFL		66.120
42	-340.701792	14.476713	SIO2	1.56029525	61.548
43	-198.092016	38.433493			63.405
44	-681.785807	14.078463	SIO2	1.56029525	69.045
45	-317.005432	27.751722			70.244
46	-110.357531	9.500172	SIO2	1.56029525	70.916
47	311.065100	22.414990			86.590
48	-1344.254472	43.792412	SIO2	1.56029525	90.705
49	-138.390126	5.810077			97.254
50	552.864897	42.476541	SIO2	1.56029525	127.381
51	-483.961511	63.875640			129.334
52	1021.980459	38.430027	SIO2	1.56029525	142.111
53	-410.501933	0.936239			142.917

54	578.822230	39.856519	SIO2	1.56029525	139.665
55	-723.060175	0.932875			138.387
56	283.549462	33.604225	SIO2	1.56029525	124.246
57	1607.080204	0.891917			120.727
58	167.944629	33.588386	SIO2	1.56029525	106.594
59	370.375071	0.941416			101.486
60	94.822236	39.056245	SIO2	1.56029525	80.000
61	175.331402	0.944860			70.631
62	58.889747	49.845949	SIO2	1.56029525	50.337
63	0.000000	2.000000	H2OV193	1.43682260	19.381
64	0.000000	-0.000335	H2OV193	1.43682260	15.750
65	0.000000	0.000335			15.750

5

Tabelle 6

Fläche	3	7	9	14 = 24	18 = 20
K	0	0	0	0	0
C1	2.886968E-08	6.178555E-08	-1.273482E-07	-2.178828E-08	1.372393E-08
C2	1.135834E-12	6.960497E-13	4.938210E-12	-2.747119E-13	-3.413863E-13
C3	2.526440E-17	-5.947244E-17	-3.380917E-16	2.007136E-17	1.076781E-17
C4	-2.060922E-21	3.751921E-20	1.794088E-20	1.731842E-21	-3.258468E-22
C5	-7.650561E-25	-4.325897E-24	-7.057449E-25	-2.027055E-25	6.466061E-27
C6	5.723867E-29	7.686244E-29	2.539541E-30	5.423640E-30	-5.896986E-32

10

Fläche	28 = 38	32 = 34	48	52	57
K	0	0	0	0	0
C1	7.190084E-08	-3.011106E-08	-5.757903E-08	-3.792122E-08	-2.413143E-08
C2	-5.639061E-13	1.342687E-12	1.903176E-12	1.535276E-12	2.795676E-12
C3	9.086478E-18	-6.959794E-17	-7.267601E-17	-1.992532E-17	-1.365078E-16
C4	8.555051E-22	3.712216E-21	1.940815E-21	-4.676144E-22	5.749863E-21
C5	-2.763206E-26	-1.392566E-25	-1.899677E-25	2.069154E-26	-1.655627E-25
C6	-9.351012E-31	2.691744E-30	-4.747025E-30	-2.314945E-31	2.725293E-30

15

Tabelle 7

Fläch	Radius	Dicke	Mat rial	Ind x	½ Durchm.
0	0.000000	40.000000			63.000
1	0.000000	0.000000			72.900
2	169.031176	30.007246	SIO2HL	1.56029525	77.565
3	172.807988	86.884665			76.339
4	262.433301	42.053156	SIO2HL	1.56029525	100.639
5	-396.930898	170.685368			100.745
6	91.344099	19.740243	SIO2HL	1.56029525	71.904
7	105.469868	16.142176			67.557
8	137.822248	20.121802	SIO2HL	1.56029525	65.141
9	591.277033	20.282197			61.580
10	0.000000	102.718997			54.773
11	344.588322	32.632993	SIO2HL	1.56029525	64.580
12	-119.973712	98.386450			64.972
13	0.000000	10.002615			42.632
14	0.000000	-100.001190	REFL		118.932
15	-248.418133	-48.786808	SIO2HL	-1.56029525	101.847
16	260.257319	-174.240023			102.623
17	751.662806	-15.000000	SIO2HL	-1.56029525	96.605
18	-546.358993	-49.118038			97.378
19	142.990930	-15.000000	SIO2HL	-1.56029525	97.645
20	1260.283293	-34.592380			115.849
21	192.845940	34.592380	REFL		117.242
22	1260.283293	15.000000	SIO2HL	1.56029525	114.937
23	142.990930	49.118038			91.181
24	-546.358993	15.000000	SIO2HL	1.56029525	86.779
25	751.662806	174.240023			82.828
26	260.257319	48.786808	SIO2HL	1.56029525	78.494
27	-248.418133	99.999230			75.744
28	0.000000	95.015900			42.841
29	177.681287	30.008789	SIO2HL	1.56029525	65.929
30	-516.705121	171.287965			67.227
31	217.817800	29.576821	SIO2HL	1.56029525	88.903
32	310.498099	41.618560			86.845
33	-166.352653	15.000000	SIO2HL	1.56029525	86.950
34	439.160019	39.859648			98.417
35	-192.193047	-39.859648	REFL		100.860
36	439.160019	-15.000000	SIO2HL	-1.56029525	99.124
37	-166.352653	-41.618560			87.790
38	310.498099	-29.576821	SIO2HL	-1.56029525	87.638
39	217.817800	-171.287965			89.485
40	-516.705121	-30.008789	SIO2HL	-1.56029525	64.348
41	177.681287	-60.011782			62.727
42	0.000000	-9.997777			44.036
43	0.000000	90.957117	REFL		58.394
44	144.598375	33.191986	SIO2HL	1.56029525	66.065
45	-312.576397	52.726003			66.275
46	-107.389980	9.492973	SIO2HL	1.56029525	62.695
47	165.658290	32.869123			71.558
48	-577.192238	25.782062	SIO2HL	1.56029525	78.414
49	-150.951285	0.976825			84.261
50	29506.35748	24.339009	SIO2HL	1.56029525	100.691
51	-374.391026	0.956935			104.021
52	644.947215	57.187603	SIO2HL	1.56029525	113.079
53	-174.623921	16.895926			114.436

54	1344.546605	39.235791	SIO2HL	1.56029525	103.044
55	-218.318622	12.126286			101.595
56	-165.249581	9.493815	SIO2HL	1.56029525	99.807
57	-529.158535	0.942157			101.677
58	199.277639	44.383379	SIO2HL	1.56029525	100.857
59	-	7.470338			98.182
60	208.537801	18.754883	SIO2HL	1.56029525	85.455
61	334.304631	5.703329			80.986
62	83.732122	29.895330	SIO2HL	1.56029525	65.881
63	175.404465	0.950929			58.182
64	81.491876	26.728679	SIO2HL	1.56029525	51.783
65	443.279667	3.284129			42.929
66	0	10	SIO2HL	1.56029525	39.654
67	0	6			32.119
68	0	0			15.764

5 Tabelle 8

Fläche	3	9	11	16 = 26	20 = 22
K	0	0	0	0	0
C1	3.188825E-08	5.249301E-08	-1.523480E-07	-2.416867E-08	2.294396E-08
C2	2.650655E-13	9.672904E-12	6.099552E-12	-5.962244E-13	-1.007737E-12
C3	-6.675542E-17	5.067159E-15	-1.442430E-16	1.303177E-17	5.222514E-17
C4	2.771063E-20	-2.297083E-19	-4.973879E-20	4.998372E-22	-4.373272E-21
C5	-3.914426E-24	4.468892E-23	1.037858E-23	2.854081E-26	2.022375E-25
C6	2.025798E-28	6.699558E-27	-7.916827E-28	-4.246522E-30	-5.622426E-30

Fläche	30 = 40	36 = 34	48	52	63
K	0	0	0	0	0
C1	7.462841E-08	-6.215300E-08	-1.263170E-07	-3.644419E-08	1.073460E-07
C2	-1.480049E-12	3.990211E-12	1.704645E-12	2.830363E-12	3.012743E-11
C3	7.038597E-18	-2.682924E-16	-1.072376E-16	-6.930387E-17	-1.142275E-15
C4	-6.746798E-21	1.575407E-20	1.095795E-19	-7.697280E-21	2.057679E-19
C5	1.842201E-24	-6.565311E-25	-9.786894E-24	7.864096E-25	1.754484E-23
C6	-1.185318E-28	1.800037E-29	8.828862E-28	-2.506008E-29	3.450730E-27

Patentansprüche

1. Katadioptrisches Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters in eine Bildebene des Projektionsobjektivs unter Erzeugung mindestens eines reellen Zwischenbildes bei einer bildseitigen numerischen Apertur $NA > 0,7$ mit:

einer optischen Achse; und

mindestens einem katadioptrischen Objektivteil, der einen Konkavspiegel und einen ersten Faltungsspiegel umfasst;

wobei ein von der Objektebene zum Konkavspiegel verlaufender erster Strahlabschnitt und ein vom Konkavspiegel zur Bildebene verlaufender zweiter Strahlabschnitt erzeugbar sind;

und der erste Faltungsspiegel in Bezug auf den Konkavspiegel derart angeordnet ist, dass einer der Strahlabschnitte an dem ersten Faltungsspiegel gefaltet wird und der andere Strahlabschnitt den ersten Faltungsspiegel vignettierungsfrei passiert und der erste Strahlabschnitt und der zweite Strahlabschnitt sich in einem Kreuzungsbereich überkreuzen.

2. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem der erste Faltungsspiegel so angeordnet ist, dass der erste Strahlabschnitt am ersten Faltungsspiegel gefaltet wird und der zweite Strahlabschnitt den ersten Faltungsspiegel vignettierungsfrei passiert.

3. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem der erste Faltungsspiegel eine der optischen Achse abgewandte Spiegelfläche hat.

4. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem der erste Faltungsspiegel so angeordnet ist, dass der erste Strahlabschnitt den ersten Faltungsspiegel vignettierungsfrei passiert und der zweite Strahlabschnitt am ersten Faltungsspiegel gefaltet wird.

5. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem der erste Faltungsspiegel eine der optischen Achse zugewandte Spiegelfläche hat.
6. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das nur einen einzigen Konkavspiegel hat.
7. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das nur ein einziges Zwischenbild erzeugt.
8. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das zusätzlich zu dem ersten Faltungsspiegel mindestens einen zweiten Faltungsspiegel aufweist.
9. Projektionsobjektiv nach Anspruch 8, bei dem der mindestens eine zweite Faltungsspiegel relativ zu dem ersten Faltungsspiegel so ausgerichtet ist, dass die Objektebene und die Bildebene parallel zueinander verlaufen.
10. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das nur ein einziges reelles Zwischenbild sowie einen einzigen Konkavspiegel und zwei Faltungsspiegel umfasst, die für eine parallele Ausrichtung von Objektebene und Bildebene ausgerichtet sind.
11. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das zusätzlich zu dem ersten Faltungsspiegel mindestens einen zweiten Faltungsspiegel aufweist, wobei der erste Faltungsspiegel und der zweite Faltungsspiegel separate Faltungsspiegel sind, die in gesonderten Fassungen montiert sind.

12. Projektionsobjektiv nach Anspruch 11, bei dem der erste Faltungsspiegel und der zweite Faltungsspiegel derart an gegenüberliegenden Seiten der optischen Achse angeordnet sind, dass eine genutzte Spiegelfläche des ersten Faltungsspiegels überwiegend oder vollständig auf einer Seite der optischen Achse und eine genutzte Spiegelfläche des zweiten Faltungsspiegels überwiegend oder vollständig auf der gegenüberliegenden Seite der optischen Achse angeordnet ist.

13. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das einen katadioptrischen Objektivteil hat, der einen Konkavspiegel und einen dem Konkavspiegel zugeordneten ersten Faltungsspiegel zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel hat, wobei ein zweiter Faltungsspiegel zur Umlenkung der vom Konkavspiegel reflektierten Strahlung zur Bildebene vorgesehen ist und der zweite Faltungsspiegel sich mindestens teilweise in einem axialen Raum befindet, der in Richtung der optischen Achse zwischen der Objektebene und dem ersten Faltungsspiegel liegt.

14. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem der erste Faltungsspiegel eine der optischen Achse nahe innere Spiegelkante hat und ein Zwischenbild in geometrischer Nähe der inneren Spiegelkante angeordnet ist.

15. Projektionsobjektiv nach Anspruch 14, bei dem ein geometrischer Abstand zwischen dem Zwischenbild und der inneren Spiegelkante weniger als 30% einer meridionalen Ausdehnung des Zwischenbildes beträgt.

16. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem der erste Faltungsspiegel eine der optischen Achse nahe innere Spiegelkante hat und ein Zwischenbild in einem geometrischen Raum zwischen der

inneren Spiegelkante und einer dem ersten Faltungsspiegel geometrisch vorgelagerten Feldebene und/oder einer dem ersten Faltungsspiegel geometrisch vorgelagerten optischen Komponente angeordnet ist.

17. Projektionsobjektiv nach Anspruch 16, bei dem die Feldebene die Objektebene ist

18. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem mindestens ein Zwischenbild in optischer Nähe eines Faltungsspiegels angeordnet ist.

19. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem zwischen dem Zwischenbild und einem optisch nächstliegenden Faltungsspiegel kein optisches Element angeordnet ist.

20. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem das Zwischenbild mit Abstand von einem optisch nächsten Faltungsspiegel angeordnet ist.

21. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem das Projektionsobjektiv mindestens zwei Konkavspiegel hat.

22. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem das Projektionsobjektiv mindestens zwei katadioptrische Objektivteile hat, die jeweils einen Konkavspiegel und einen dem Konkavspiegel zugeordneten Faltungsspiegel zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel oder zur Umlenkung der vom Konkavspiegel reflektierten Strahlung zur Bildebene hat.

23. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem einem katadioptrischen Objektivteil, der eine gekreuzte Strahlführung aufweist, mindestens ein refraktives und/oder mindestens ein katadioptrisches Abbildungssystem vorgeschaltet ist.

24. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem einem katadioptrischen Objektivteil, der eine gekreuzte Strahlführung aufweist, mindestens ein refraktives und/oder mindestens ein katadioptrisches Abbildungssystem nachgeschaltet ist.

25. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das einen ersten Objektivteil zur Abbildung des Objektfeldes in ein erstes reelles Zwischenbild, einen zweiten Objektivteil zur Erzeugung eines zweiten reellen Zwischenbildes mit der von dem ersten Objektivteil kommenden Strahlung, einen dritten Objektivteil zur Erzeugung eines dritten reellen Zwischenbildes aus der vom zweiten Objektivteil kommenden Strahlung sowie einen vierten Objektivteil zur Abbildung des dritten reellen Zwischenbildes in die Bildebene umfasst.

26. Projektionsobjektiv nach Anspruch 25, bei dem genau drei Zwischenbilder vorgesehen sind.

27. Projektionsobjektiv nach Anspruch 25, bei dem zwei der Objektivteile katadioptrisch sind und jeweils einen Konkavspiegel haben.

28. Projektionsobjektiv nach Anspruch 25, bei dem der erste Objektivteil refraktiv ist und der zweite Objektivteil und der dritte Objektivteil als katadioptrische Systeme mit jeweils einem Konkavspiegel ausgelegt und jedem der Konkavspiegel ein Faltungsspiegel zugeordnet ist, um entweder die Strahlung zum Konkavspiegel umzulenken oder die vom Konkavspiegel kommende Strahlung in Richtung eines nachfolgenden Objektivteils umzulenken.

29. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem mehrere Zwischenbilder vorgesehen sind und alle Zwischenbilder in geometrischer Nähe eines Faltungsspiegels angeordnet sind.

30. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem mehrere Zwischenbilder vorgesehen sind und alle Zwischenbilder mit Abstand von einer Faltungsspiegel angeordnet sind.

31. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem ein Maximalabstand eines Zwischenbildes von einer Spiegelfläche eines Faltungsspiegels weniger als 10% der Gesamtlänge des Projektionsobjektivs beträgt.

32. Projektionsobjektiv nach Anspruch 25, bei dem der erste Objektivteil in Bezug auf eine senkrecht auf der optischen Achse stehende Ebene asymmetrisch aufgebaut ist.

33. Projektionsobjektiv nach Anspruch 25, bei dem der erste Objektivteil im wesentlichen symmetrisch zu einer senkrecht auf der optischen Achse stehenden Ebene aufgebaut ist.

34. Projektionsobjektiv nach Anspruch 25, bei dem der erste Objektivteil mindestens zwei Linsen mit Linsenflächen aufweist, die im Wesentlichen den gleichen Radius haben.

35. Projektionsobjektiv nach Anspruch 25, bei dem der zweite Objektivteil und der dritte Objektivteil asymmetrisch aufgebaut sind, wobei einer der Objektivteile überwiegend zur Korrektur der Bidlfeldkrümmung und der andere Objektivteil überwiegend zur chromatischen Korrektur ausgelegt ist.

36. Projektionsobjektiv nach Anspruch 25, bei dem der zweite Objektivteil und der dritte Objektivteil im wesentlichen symmetrisch zueinander aufgebaut sind.

37. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem ein erster katadioptrischer Objektivteil eine erste optische Achse und ein zweiter

katadioptrischer Objektivteil eine zweite optische Achse hat und die erste und die zweite optische Achse coaxial angeordnet sind.

38. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem ein erster katadioptrischer Objektivteil eine erste optische Achse und ein zweiter katadioptrischer Objektivteil eine zweite optische Achse hat und die erste und die zweite optische Achse versetzt zueinander angeordnet sind.

39. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das einen ersten und mindestens einen zweiten katadioptrischen Objektivteil hat, die jeweils einen Konkavspiegel und einen dem Konkavspiegel zugeordneten Faltungsspiegel zur Umlenkung der von der Objektebene kommenden Strahlung zum Konkavspiegel oder zur Umlenkung der vom Konkavspiegel reflektierten Strahlung zur Bildebene haben, wobei zwischen den katadioptrischen Objektivteilen ein Relaissystem zur Abbildung eines mit Hilfe des ersten katadioptrischen Objektivteils erzeugten Zwischenbildes in eine Objektebene des zweiten katadioptrischen Objektivteils angeordnet ist.

40. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das für Ultraviolettlicht aus einem Wellenlängenbereich zwischen ca. 120 nm und ca. 260 nm ausgelegt ist, insbesondere für eine Arbeitswellenlänge von ca. 193 nm oder ca. 157 nm.

41. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das als Trockenobjektiv dafür ausgelegt ist, dass im Betrieb zwischen einer Austrittsfläche des Projektionsobjektivs und einer Einkoppelfläche des Substrats ein mit Gas gefüllter Spalt vorliegt.

42. Projektionsobjektiv nach Anspruch 41, das eine bildseitige numerische Apertur von $NA > 0,8$ und/oder $NA \geq 0,85$ und/oder $NA \geq 0,9$ hat.

43. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, das als Immersionsobjektiv dafür ausgelegt ist, dass im Betrieb zwischen einer Austrittsfläche des Projektionsobjektivs und einer Einkoppelfläche des Substrats ein Immersionsmedium mit hohem Brechungsindex eingebracht ist.

44. Projektionsobjektiv nach Anspruch 43, bei dem das Immersionsmedium bei der Arbeitswellenlänge einen Brechungsindex $n_i \geq 1,3$ hat.

45. Projektionsobjektiv nach Anspruch 43, das in Verbindung mit dem Immersionsmedium eine bildseitige numerische Apertur $NA > 0,98$ hat,

46. Projektionsobjektiv nach Anspruch 45, bei dem die numerische Apertur $NA \geq 1$, und/oder $NA \geq 1,1$ und/oder oder $NA \geq 1,2$ und/oder $NA \geq 1,3$ ist.

47. Projektionsobjektiv nach Anspruch 1, bei dem ein Diagonalverhältnis zwischen einer Länge einer Diagonale eines zur optischen Achse zentrierten, das Objektfeld einschließenden Minimalkreises und einer Länge einer Diagonale des Objektfeldes weniger als 1,5 beträgt.

48. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem Beleuchtungssystem und einem katadioptrischen Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters in eine Bildebene des Projektionsobjektivs unter Erzeugung mindestens eines reellen Zwischenbildes bei einer bildseitigen numerischen Apertur $NA > 0,7$ mit:

einer optischen Achse; und

mindestens einem katadioptrischen Objektivteil, der einen Konkavspiegel und einen ersten Faltungsspiegel umfasst;

wobei ein von der Objektebene zum Konkavspiegel verlaufender erster Strahlabschnitt und ein vom Konkavspiegel zur Bildebene verlaufender zweiter Strahlabschnitt erzeugbar sind;

und der erste Faltungsspiegel in Bezug auf den Konkavspiegel derart angeordnet ist, dass einer der Strahlabschnitte an dem ersten Faltungsspiegel gefaltet wird und der andere Strahlabschnitt den ersten Faltungsspiegel vignettierungsfrei passiert und der erste Strahlabschnitt und der zweite Strahlabschnitt sich in einem Kreuzungsbereich überkreuzen.

49. Projektionsbelichtungsanlage für die Mikrolithographie mit einem Beleuchtungssystem und einem katadioptrischen Projektionsobjektiv zur Abbildung eines in einer Objektebene des Projektionsobjektivs angeordneten Musters einer Maske in eine Bildebene des Projektionsobjektivs unter Erzeugung mindestens eines reellen Zwischenbildes,

wobei das Projektionsobjektiv eine optischen Achse und mindestens einen katadioptrischen Objektivteil aufweist, der einen Konkavspiegel und einen ersten Faltungsspiegel umfasst;

wobei eine Summe S aus einer Anzahl Z der Zwischenbilder, einer Anzahl F der Faltungsspiegel und einer Anzahl K der Konkavspiegel des Projektionsobjektivs eine ungerade ganze Zahl ist und wobei eine Steuereinrichtung zur Ansteuerung einer Einrichtung zum Bewegen der Maske und einer Einrichtung zum Bewegen des Substrates derart konfiguriert ist, dass die Maske und das Substrat gleichläufig in parallelen Richtungen bewegbar sind.

50. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:

Bereitstellung einer Maske mit einem vorgegebenen Muster im Bereich einer Objektebene eines katadioptrischen Projektionsobjektivs;

Beleuchtung der Maske mit Ultraviolettlicht einer vorgegebenen Wellenlänge;

Projektion eines Bildes des Musters auf ein im Bereich der Bildebene eines Projektionsobjektivs angeordnetes, lichtempfindliches Substrat mit Hilfe eines katadioptrischen Projektionsobjektivs gemäß Anspruch 1.

51. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:

Bereitstellung einer Maske mit einem vorgegebenen Muster im Bereich einer Objektebene eines katadioptrischen Projektionsobjektivs;

Beleuchtung der Maske mit Ultraviolettlicht einer vorgegebenen Wellenlänge;

Projektion eines Bildes des Musters auf ein im Bereich der Bildebene des Projektionsobjektivs angeordnetes, lichtempfindliches Substrat mit Hilfe eines katadioptrischen Projektionsobjektivs gemäß Anspruch 1;

wobei bei der Projektion ein zwischen einer letzten optischen Fläche des Projektionsobjektives und dem Substrat angeordnetes Immersionsmedium durchstrahlt wird.

52. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:

Bereitstellen einer Maske mit einem vorgegebenen Muster im Bereich einer Objektebene eines katadioptrischen Projektionsobjektivs;

Bereitstellen eines lichtempfindlichen Substrates im Bereich der Bildebene des Projektionsobjektivs;

Beleuchtung der Maske mit Ultraviolettlicht einer vorgegebenen Arbeitswellenlänge;

Einstellen eines endlichen Arbeitsabstandes zwischen einer dem Projektionsobjektiv zugeordneten Austrittsfläche und einer dem Substrat zugeordneten Einkoppelfläche,

wobei der Arbeitsabstand innerhalb eines Belichtungszeitintervalles mindestens zeitweise auf einen Wert eingestellt wird, der kleiner ist als